

ВЫСШЕЕ ОБРАЗОВАНИЕ – БАКАЛАВРИАТ

серия основана в 1996 г.



Г.П. ФЕТИСОВ

Ф.А. ГАРИФУЛЛИН

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ

УЧЕБНИК

Рекомендовано

*Научно-методическим советом по материаловедению
и технологии конструкционных материалов
при Минобрнауки РФ в качестве учебника для бакалавров
высших учебных заведений инженерно-технического профиля*

Электронно-
Библиотечная
Система
znanium.com

Соответствует
Федеральному государственному
образовательному стандарту
3-го поколения

Москва
ИНФРА-М
2014

УДК 620(075.8)

ББК 30.3я73

Ф45

ФЗ
№ 436-ФЗ

Издание не подлежит маркировке
в соответствии с п. 1 ч. 2 ст. 1

Рецензенты:

В.М. Матютин, д-р техн. наук, проф. кафедры «Технология металлов» Московского энергетического института (ТУ);

Г.Н. Гаврилов, д-р техн. наук, проф. кафедры «Материаловедение и технология новых материалов» Нижегородского государственного технического университета.

Фетисов Г.П., Гарифуллин Ф.А.

Ф45 **Материаловедение и технология материалов: Учебник.** — М.: ИНФРА-М, 2014. — 397 с. — (Высшее образование: Бакалавриат). — DOI 10.12737/3557 (www.doi.org).

ISBN 978-5-16-006899-2 (print)

ISBN 978-5-16-101391-5 (online)

В учебнике рассмотрены структура, строение и свойства металлических и неметаллических материалов, механические характеристики этих материалов и методы их оценки, а также методы термической и химико-термической обработки; изложены основы теории и технологии получения заготовок литьем, давлением, механической обработкой, сваркой и пайкой.

Учебник предназначен для бакалавров высших учебных заведений, обучающихся по машиностроительным специальностям.

ББК 30.3я73

ISBN 978-5-16-006899-2 (print)

ISBN 978-5-16-101391-5 (online)

© Фетисов Г.П.,
Гарифуллин Ф.А., 2014

ПРЕДИСЛОВИЕ

Материаловедение и технология материалов относятся к тем дисциплинам, которые формируют основу инженерной подготовки технического специалиста, являются показателями его технической образованности. Наличие необходимых материалов, технологических процессов позволяет претворить идею, замысел разработчика, конструктора в конкретное изделие — нужную для человека техническую продукцию. Повышение качества изделий, рост производительности труда, а в итоге — конкурентоспособности потребовали создания материалов с уникальными свойствами и новых технологических процессов их обработки. Особенно это заметно в авиационно-космической, электронной, радиотехнической, атомной промышленности. Поэтому справедливо утверждение, что производственный и экономический потенциал любой страны в значительной степени определяется состоянием ее материаловедческой и технологической базы. Если в далекие годы технологию могли рассматривать как простое ремесло, то сейчас материаловедение и технология представляют собой обширную, сложную область знаний, базирующуюся на многих смежных, и прежде всего фундаментальных, науках — физике, химии, математике.

Этот учебник позволит учащемуся войти подготовленным в интересный мир производства, обеспечит ему базу для изучения последующих дисциплин технологического цикла.

Часть 1 «Материаловедение» написана профессором Ф.А. Гарифуллиным, часть 2 «Технология материалов» — профессором Г.П. Фетисовым.

Авторы выражают глубокую благодарность рецензентам — профессорам Г.Н. Гаврилову и В.М. Матюнину за ценные предложения по улучшению содержания учебника.

Часть 1

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

Материаловедение как наука занимается изучением строения материалов в тесной связи с их свойствами.

Первые шаги на пути к реальному пониманию свойств материалов были сделаны с наступлением XIX в. Начало этому положила химия, затем физика. Теоретическая химия оказалась весьма полезной и при решении практических вопросов, способствовала появлению более эффективных методов обработки материалов. Так, известный физик Майкл Фарадей (1791–1867) применил химический анализ при изучении свойств булатной стали. Затем знаменитый русский металлург Павел Петрович Аносов (1796–1851) при исследовании структуры булатной стали одним из первых (в 1831 г.) использовал микроскоп. Он увидел, что булатные узоры связаны со структурой стали и с ее механическими свойствами. Анализ структуры металлов и различных минералов с помощью оптического микроскопа в дальнейшем нашел широкое распространение в трудах английского геолога Генри Сорби (1826–1908).

Эти первые наблюдения изменений, происходящих с внутренней структурой металла, а также новые сведения о составе вещества, полученные с помощью химии, существенно изменили представления о возможности проникновения в природу материалов.

В последней четверти XIX в. химия и физика уже играли ключевую роль в развитии многих сложившихся к тому времени отраслей, связанных с производством материалов. Здесь уместно отметить роль русского ученого Дмитрия Константиновича Чернова (1839–1921) в становлении науки о материалах. На заседании Российского технического общества в 1868 г. он сообщил об открытии критических точек сталей, впоследствии названных «точками Чернова». На основе глубокого научного анализа Д.К. Чернов объяснил удивительные свойства булатной стали. Его труды ускорили становление науки о материаловедении как точной науки.

В XX столетии химикам и физикам удалось сделать ряд фундаментальных открытий, на которые опираются все современные разра-

ботки новых материалов и технологические методы их получения и обработки.

Основной вклад науки в рассматриваемую область состоял в том, что ученые установили взаимосвязь между внешне проявляющимися свойствами материалов и их внутренним строением. Как выяснилось, материалам свойственна определенная внутренняя архитектура, иными словами — иерархическая последовательность структурных уровней, что объясняло многообразие проявляемых материалами свойств. Это предполагало, что поведение того или иного материала можно предсказать заранее, если тщательно изучить его внутреннюю архитектуру.

Появление новых приборов и методов позволило глубже проникнуть в природу материалов. П.П. Аносов и Г. Сорби с помощью оптического микроскопа сумели разглядеть лишь микроструктуру стали. Со временем на смену оптическому пришел электронный микроскоп, позволивший увидеть элементы субструктуры, а затем — растровый электронный микроскоп, с помощью которого стало возможным получать информацию о пространственной структуре поверхности. Картину пространственного расположения атомов и молекул в кристалле можно получить методом дифракции рентгеновских лучей, а характерные особенности атомов того или иного материала — различными методами спектроскопии, основанными на возбуждении атомов исследуемого материала.

Раскрытие внутренней структуры материалов создало основу для понимания твердого состояния вещества вообще и конкретных материалов в частности. Объединение знаний, полученных теоретическим и опытным путем, позволило не только разработать более эффективные методы обработки природных материалов, но и создать огромное количество новых искусственных материалов, таких как синтетические волокна и пластмассы; высоконапряженные и жаропрочные металлические сплавы; стеклянные волокна, используемые в качестве оптических волноводов; магниты, изготовленные из редкоземельных химических элементов; различные виды высоконапряженной керамики; композиты и полупроводники, составляющие основу современной микроэлектроники.

Эти результаты достигнуты наукой, сформировавшейся на основе интеграции различных дисциплин и получившей название материаловедение. Ее представители имеют дело с изучением взаимосвязей между структурой, свойствами и поведением материалов, а также от методов обработки материалов.

Раздел I

СТРУКТУРА МАТЕРИАЛОВ

Глава 1

КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ

ТВЕРДЫХ ТЕЛ

1.1. КРИСТАЛЛЫ

Различают два вида твердых тел: *кристаллические* и *аморфные*. Примером кристаллического тела является каменная (или поваренная) соль. Типичный пример аморфного тела — обыкновенное стекло. У аморфного тела отсутствует определенная температура плавления. В этом состоит одно из основных его отличий от кристаллического. Вместо фиксированной температуры плавления у аморфного тела наблюдается более или менее растянутый интервал размягчения, в котором оно переходит из твердого в жидкое состояние.

Кристаллы — это вещества, в которых составляющие их частицы (то есть атомы, ионы, молекулы, группы атомов) расположены правильными, симметричными, периодически повторяющимися рядами, сетками, решетками. В природе вырастают кристаллы природных минералов. На заводах и в лабораториях выращивают синтетические кристаллы.

Всякий кристалл состоит из отдельных атомов одного или нескольких видов. Совокупность атомов образует то, что называется *кристаллической решеткой* (рис. 1.1). Эта строгая пространственная периодичность в структуре кристалла — характерная его черта. Силы связи между атомами заставляют частицы в кристалле собираться в кристаллические решетки и вырастать в виде многогранников. И характерна для кристалла не сама многогранная форма, не результат роста, а способность расти в такой форме; эта способность не исчезает.

Решетку можно описать с помощью периодически повторяющегося в пространстве элементарного параллелепипеда — элементарной ячейки. Наименьший объем кристалла, дающий представление об атомной структуре металла, называется *элементарной кристаллической ячейкой*. На рис. 1.1 она выделена жирным.

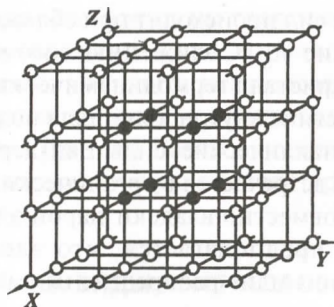


Рис. 1.1. Кристаллическая решетка

1.2. ТИПЫ СВЯЗЕЙ

Природа сил, удерживающих ионы, атомы или молекулы в определенных местах кристаллической решетки, определяет строение кристалла и его свойства. Характер связи, возникающей между элементарными частицами в кристалле, формируется электронным строением атомов, вступающих во взаимодействие. Элементарные частицы в кристалле сближаются на расстояние, которое обеспечивает кристаллу наибольшую термодинамическую стабильность. Силы притяжения возникают благодаря взаимодействию электронов с положительно заряженным ядром собственного атома, а также с ядрами соседних атомов. Силы отталкивания возникают в результате взаимодействия положительных ядер соседних атомов при их сближении (рис. 1.2).

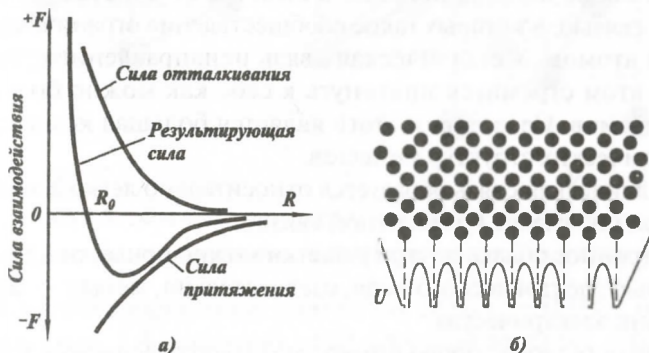


Рис. 1.2. Силы взаимодействия двух атомов (а) и изменения потенциальной энергии атомов в кристаллической решетке (б)

Уравновешивание сил происходит при сближении элементарных частиц на расстояние R_0 . Сближению соответствует минимум энергии, что делает кристалл термодинамически устойчивым.

По характеру все связи внутри кристалла подразделяют на ковалентные, ионные, металлические, силы Ван-дер-Ваальса.

Ковалентная связь встречается в органических молекулах и керамике, когда атомы совместно владеют парой электронов. В случае ковалентной связи предполагается, что электроны находятся «в общем пользовании» или «распределены» между двумя ядрами, участвующими в образовании связи.

Ионная связь. Если взаимодействие двух нейтральных атомов сопровождается истинным переносом электрона от одного атома к другому, то говорят, что связь в образовавшейся молекуле ионная или электровалентная. Такая связь встречается между положительно и отрицательно заряженными элементами, или ионами.

Если ковалентная связь является направленной, то ионные силы стремятся равномерно распределяться вокруг элементов.

Металлическая связь возникает в металлах и их сплавах, когда не образуются химические соединения. В металлическом кристалле валентные энергетические зоны атомов перекрываются, образуя общую зону с подуровнями. Это дает возможность валентным электронам свободно перемещаться в пределах этой зоны от атома к атому. Происходит обобществление валентных электронов в объеме всего кристалла. Валентные электроны в металле нельзя считать потерянными или приобретенными атомами. Они обобществлены атомами в объеме всего кристалла, в отличие от кристаллов с ковалентной связью, в которых такое обобществление ограничено одной группой атомов. Металлическая связь ненаправленная, поэтому каждый атом стремится притянуть к себе как можно больше соседних атомов. Следствием этого является большая компактность кристаллических структур металлов.

Металлическая связь образуется относительно легко и легко разрушается, она слабее ковалентной связи.

Электронное облако внутри решетки можно привести в движение с помощью электрического поля, следовательно, металл — хороший проводник электричества.

Большая тепловая проводимость металлов обеспечивается наличием этого облака электронов. Если часть металла нагрета, то кинетическая энергия электронов в данной области возрастает. Электроны распространяются по всему металлу, вызывая, таким образом, рост температуры во всей решетке.

Силы Ван-дер-Ваальса не имеют направленного характера, так как мгновенный диполь образуется с каждым из соседних атомов. В результате атомы, стремясь увеличить число соседей в кристаллической решетке, укладываются наиболее компактным образом.

Энергия связи сил Ван-дер-Ваальса невелика, поэтому молекулярные кристаллы имеют низкую температуру плавления и испарения.

1.3. ВИДЫ КРИСТАЛЛОВ

Кристаллическое вещество вообще является плотноупакованным агрегатом из атомов и ионов, так как благодаря ван-дер-ваальсовым, кулоновским и другим взаимодействиям наиболее стабильными являются структуры, в которых межатомные расстояния имеют минимально возможные значения.

Металлы имеют преимущественно три типа ячеек:

1. Объемно-центрированная кубическая структура (ОЦК), показанная на рис. 1.3, содержит атом в каждой вершине единичной ячейки, один атом находится в центре куба.

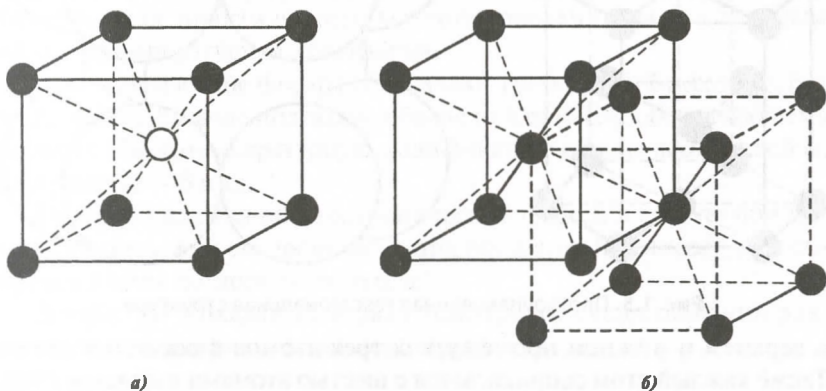


Рис. 1.3. Объемно-центрированная кубическая структура:

а — единичная ячейка; б — кристаллическая решетка

2. Гранецентрированная кубическая структура (ГЦК), представленная на рис. 1.4, содержит атом в каждой вершине куба и один атом в центре каждой грани куба; атом в центре объема отсутствует. Это плотноупакованная кубическая структура.

3. Плотноупакованная гексагональная структура (ГПУ) показана на рис. 1.5. Каждый атом в слое находится непосредственно

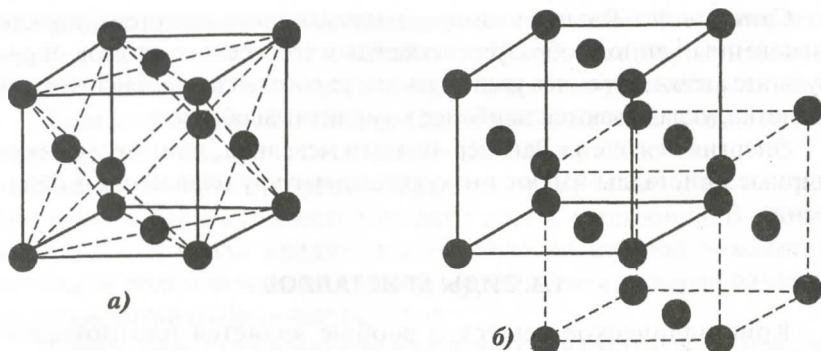


Рис. 1.4. Гранецентрированная кубическая структура:
а — единичная ячейка; *б* — кристаллическая решетка

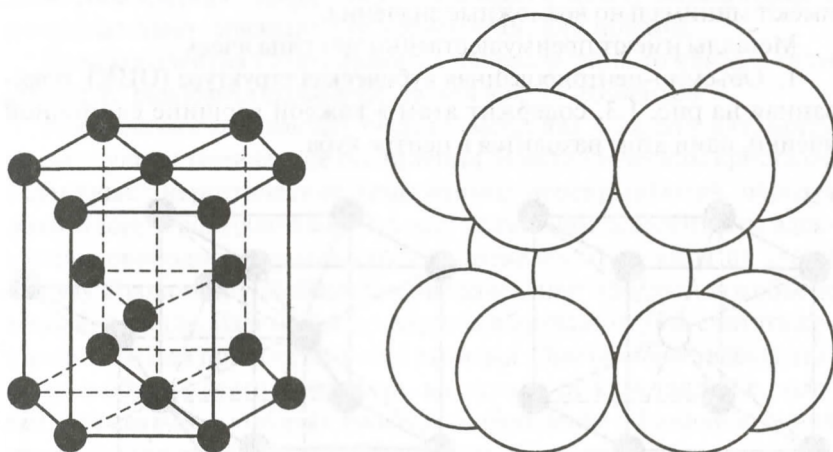


Рис. 1.5. Плотноупакованная гексагональная структура

в верхнем и нижнем промежутках трех атомов в соседних слоях. Также каждый атом соприкасается с шестью атомами в нижнем слое, тремя атомами сверху и тремя атомами снизу.

1.4. АНИЗОТРОПИЯ КРИСТАЛЛОВ

Плотность расположения атомов по различным плоскостям неодинакова.

Вследствие неодинаковой плотности атомов в различных плоскостях и направлениях решетки многие свойства (химические, физические, механические) каждого кристалла зависят от направления вырезки образца по отношению к направлениям в решетке. По-

добная неодинаковость свойств монокристалла в разных кристаллографических направлениях называется *анизотропией*.

Кристалл — тело анизотропное, в отличие от аморфных тел (стекло, пластмасса и др.), свойства которых не зависят от направлений в решетке.

Технические металлы являются поликристаллами, то есть состоят из большого количества анизотропных кристаллов. В большинстве случаев они *статистически* неупорядоченно ориентированы один по отношению к другому; поэтому во всех направлениях свойства более или менее одинаковы, то есть поликристаллическое тело является псевдоизотропным.

1.5. ПОЛИМОРФИЗМ (АЛЛОТРОПИЯ)

Существование одного металла (вещества) в нескольких кристаллических формах называется *полиморфизмом* или *аллотропией*. Различные кристаллические формы одного вещества называются *полиморфными* или *аллотропическими модификациями*.

Небольшие изменения давления, которые могут возникать в практике, обычно не приводят к полиморфным превращениям. Поэтому для практического материаловедения важна главным образом температурная аллотропия.

Аллотропические формы обозначают греческими буквами α , β , γ и т.д., которые в виде индексов добавляют к символу, обозначающему элемент. Низкотемпературную модификацию обозначают буквой α , следующую — β и т.д.

Превращение одной аллотропической формы в другую при нагреве чистого металла происходит при постоянной температуре и сопровождается поглощением тепла.

В табл. 1.1 показан интервал температур существования различных полиморфных форм некоторых металлов.

1.6. АМОРФНЫЕ СТРУКТУРЫ

Аморфные вещества не имеют постоянной температуры плавления, они размягчаются и плавятся при повышении температуры. Это отличает их от кристаллических тел, имеющих постоянную температуру плавления. Аморфные вещества можно рассматривать как материалы с большим числом дефектов, которые определяют их свойства, значительно отличные от свойств других веществ. Слово «аморфный» означает «без формы», и это могут быть газы, жидкости

Таблица 1.1

Аллотропические формы металлов

Металл (элемент)	Аллотропическая форма	Интервал температур устойчивого состояния, °С	Кристаллическая решетка
1	2	3	4
Fe	α	< 911	Кубическая объемно-центрированная (К8)
	δ	1392–1539	То же
	γ	911–1392	Кубическая гранецентрированная (К12)
Co	α	< 450	Гексагональная (Г12)
	β	450–1480	Кубическая гранецентрированная (К12)
Sn	α	< 18	Решетка алмаза
	β	18–232	Тетрагональная объемно-центрированная
Mn	α	< 700	Кубическая сложная многоатомная
	β	700–1079	То же
	γ	1079–1143	Тетрагональная гранецентрированная
	δ	1143–1244	Кубическая объемно-центрированная (К8)
Ti	α	< 882	Гексагональная (Г12)
	β	882–1668	Кубическая объемно-центрированная (К8)
Zr	α	< 867	Гексагональная (Г12)
	β	867–1860	Кубическая объемно-центрированная (К8)
U	α	< 660	Ромбическая
	β	660–770	Тетрагональная
	γ	770–1133	Кубическая объемно-центрированная (К8)

и стекло. Обычными аморфными материалами при комнатной температуре являются вода, нефть, ртуть, стекло. При высокой температуре стекло является жидкостью.

Большинство аморфных материалов обладает ближним порядком. В то же время упаковка молекул без дальнего порядка позволит создать большие плотности — ведь часть молекул может менять свою форму; если разные молекулы деформируются по-разному, то дальний порядок становится невозможным, а плотная упаковка вполне осуществима. Если форма молекул такова, что образование дальнего порядка приводит к большей доле пустого места, чем при отсутствии его при плотной упаковке, то кристалл не образуется. Такие вещества не кристаллизуются, а медленно густеют, давая аморфные вещества. К аморфным относится большое число органических веществ, построенных из гигантских молекул; таковы многие пластмассы, стекло, кварц (рис. 1.6).

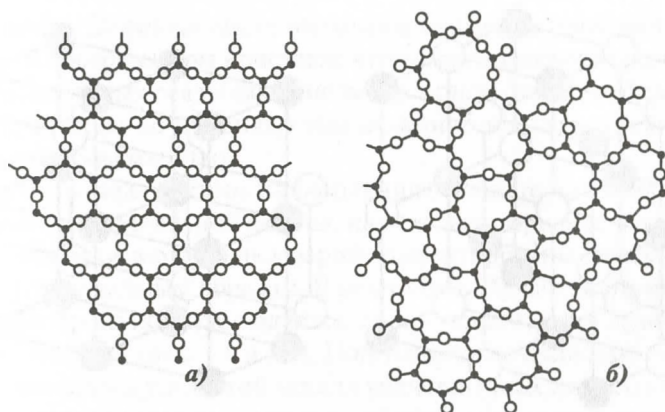


Рис. 1.6. Схема строения кварца:

черные кружки — атомы кремния, белые — кислорода. Рисунок упрощает действительную картину, так как изображает плоскую модель. Аморфный кварц (б) с точки зрения изображенной модели представляет собой «испорченную» решетку кристаллического кварца (а)

1.7. СТРУКТУРА НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Ионные кристаллы подобны металлическим кристаллам, но у них в решетке вместо атомов расположены ионы. Каждый ион расположен в окружении нескольких ионов противоположного знака. В решетке NaCl, являющейся гранецентрированным кубом, один ион расположен в узле решетки, а другие ионы (противоположного знака) — на половине ребра элементарной ячейки. Молекулу NaCl представляет ионный кристалл (рис. 1.7). Однако имеются некоторые ионные кристаллы, в узлах решетки которых — молекулы (оба иона).

Ковалентные кристаллы, основанные на пространственных решетках, были описаны выше. Здесь между соседними атомами имеется очень жесткая ковалентная связь. Прочность связи вызвана распределением валентных электронов. Ковалентные связи являются типичными для керамических материалов.

Полимеры состоят из длинных цепей повторяющихся органических молекул. Атомы внутри повторяющихся молекулярных цепей связаны сильной ковалентной связью. Однако связь между цепями вызвана слабыми силами Ван-дер-Ваальса. Некоторые полимеры бывают кристаллическими, хотя этот термин здесь понимается не в обычном смысле. Его используют для описания условий распо-

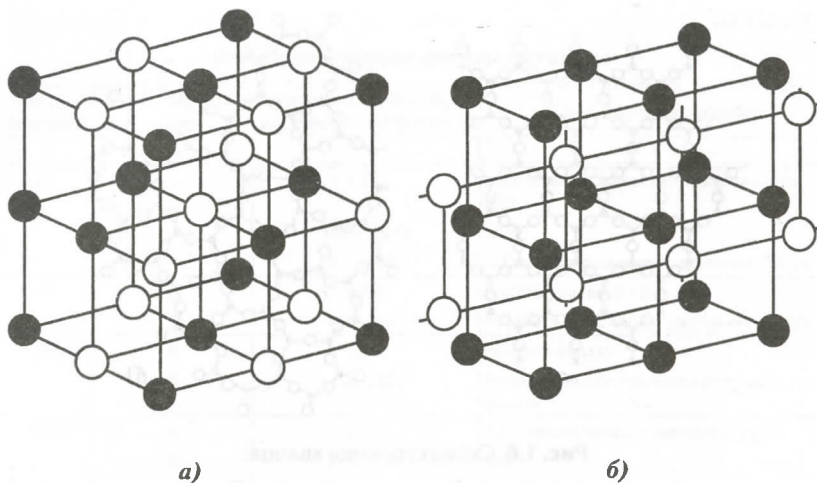


Рис. 1.7. Структура ионных кристаллов:

а — структура типа хлорида натрия: черные шары обозначают один тип ионов, белые — второй. По отдельности черные и белые шары образуют две вставленные друг в друга ГЦК-решетки; б — структура типа хлорида цезия: черные шары образуют две вставленные друг в друга простые кубические решетки

ложения длинноцепных молекул параллельно друг другу, таким образом образуется регулярная структура в некоторой области объема полимера. Когда цепи запутанны, они проявляют аморфность. Степень кристалличности зависит от расположения цепей.

Молекулярная масса полимера является важным свойством, которое можно использовать как показатель прочности материала. Так как не все цепи имеют одинаковую длину, измеряется среднее значение молекулярной массы. Один из способов определения молекулярной массы — измерение скорости истечения расплава полимера через отверстия при стандартных условиях.

Композиты представляют собой комбинацию двух или более материалов, обычно формируемую покрытием, различными добавками или ламинированием. Свойства композитов очень различны в зависимости от составляющих их материалов. Примерами являются стеклопласты, керамические материалы.

1.8. ДЕФЕКТЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ

Дефекты кристаллов являются их важным признаком, так как определяют их механические свойства, такие как сопротивление пластической деформации, ковкость, предел текучести и напряжение

разрушения. Дефекты также вызывают снижение прочности материалов. В совершенном кристалле атомы располагаются регулярно. В действительных реальных кристаллах присутствуют дефекты, которые существенно изменяют как механические, так и технологические свойства металлов.

Обычно металл состоит из скопления большого числа маленьких кристаллов неправильной формы, называемых зернами. Кристаллические решетки в отдельных зернах ориентированы относительно друг друга случайным образом. В некоторых случаях, например при холодной прокатке, наблюдается преимущественная ориентация зерен — текстура (рис. 1.8 и 1.9). Поверхности раздела зерен называются *границами зерен*. Такой металл является *поликристаллическим*.

При определенных условиях, обычно при очень медленном контролируемом отводе тепла, при кристаллизации может быть получен металл, представляющий собой один кристалл; его называют *монокристаллом*. В настоящее время в лабораториях выращивают монокристаллы в несколько сот граммов и более.

1.9. ТОЧЕЧНЫЕ ДЕФЕКТЫ

В простейшей форме точечный дефект является вакансией в результате потери атома в узле решетки и может включать более чем одно место вакансии. Дефекты вызваны несовершенством упаковки атомов в процессе кристаллизации, пластической деформацией или высокотемпературными тепловыми колебаниями атомов, когда они перемещаются из положений с низкой энергией. Дефектами могут быть катионная и анионная вакансии.

Дефект Шоттки представляет собой дефект, состоящий из анионной или катионной вакансии, встречающийся в соединении, которое может сохранять баланс заряда.

Дефект Френкеля возникает, когда атом из равновесного положения в узле решетки переходит в межузлие. Возникает пара «вакансия — межузельный атом».

Основные типы точечных дефектов показаны на рис. 1.10.

1.10. ЛИНЕЙНЫЕ ДЕФЕКТЫ

Линейные дефекты характеризуются тем, что их поперечные размеры не превышают нескольких межатомных расстояний, а длина может достигать размера кристалла.

Таковыми дефектами являются краевые и винтовые дислокации. Возможно существование смешанных дислокаций (например, петли

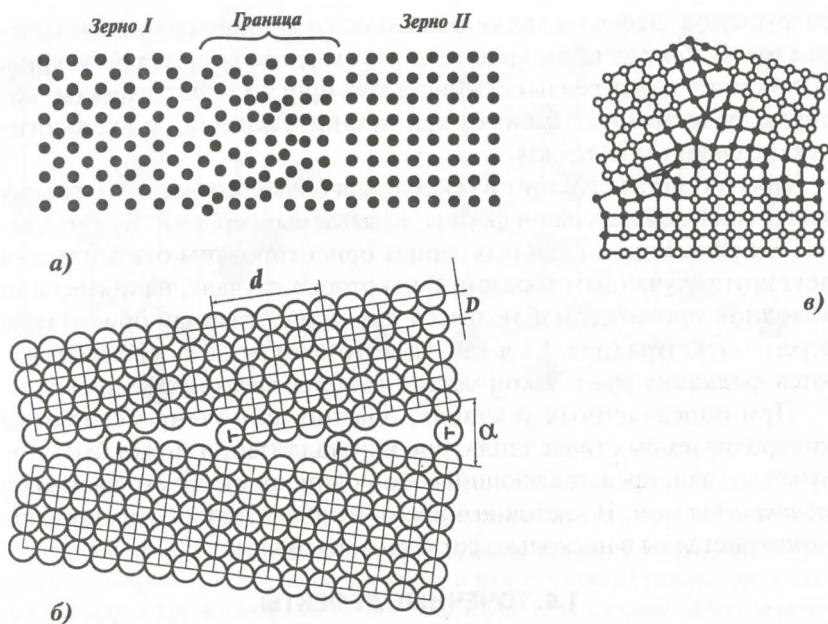


Рис. 1.8. Схема строения границы между зернами:

a — большеугольная граница; b — границы между блоками (малоугольные границы); α — угол разориентировки соседних блоков; v — схема поликристаллического строения

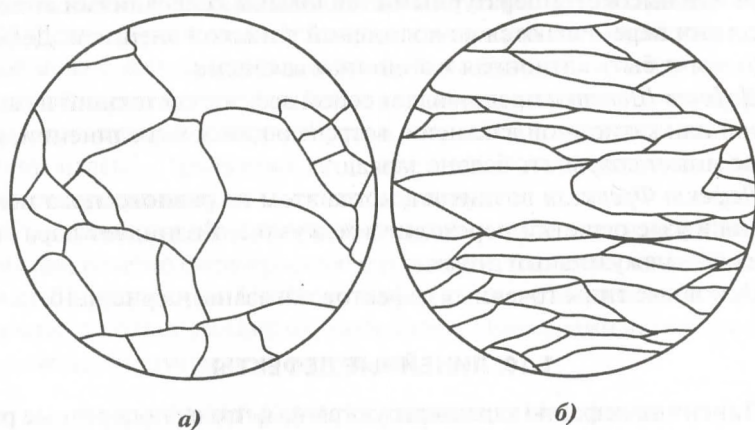


Рис. 1.9. Влияние пластической деформации на микроструктуру металла (схема):

a — до деформации; b — после деформации

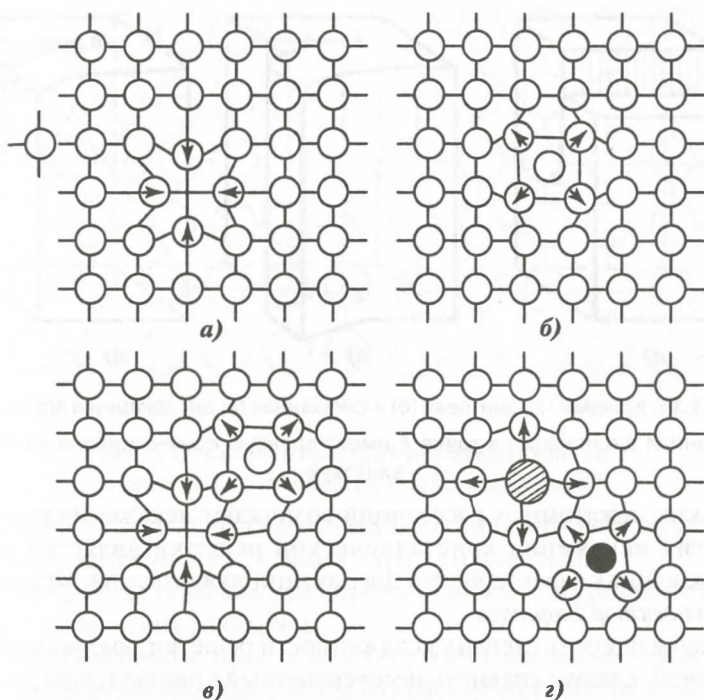


Рис. 1.10. Точечные дефекты в кристалле:

а — вакансия; *б* — дислоцированный атом; *в* — дефект Френкеля; *г* — примесные атомы замещения (большой) и внедрения (маленький). Стрелками указаны направления смещения атомов в решетке

дислокаций) (рис. 1.11). Графическое изображение дислокаций было предложено Бюргерсом и модифицировалось Франком.

Краевая дислокация представляет собой локализованное искажение кристаллической решетки, вызванное наличием в ней лишней атомной полуплоскости. Области сжатия и растяжения в металле при возникновении в кристаллической структуре приводят к росту энергии вдоль дислокации.

Винтовая дислокация представляет собой локализованное искажение кристалла, когда линия дислокации параллельна вектору сдвига. Сдвиговые напряжения также вызывают рост энергии. Винтовая дислокация смещается параллельно дефекту. Сдвиговые напряжения также вызывают рост энергии.

При винтовой дислокации дополнительные атомы могут добавляться по винтовому ~~шагу~~. ~~Вокруг дислокаций~~ на протяжении не-

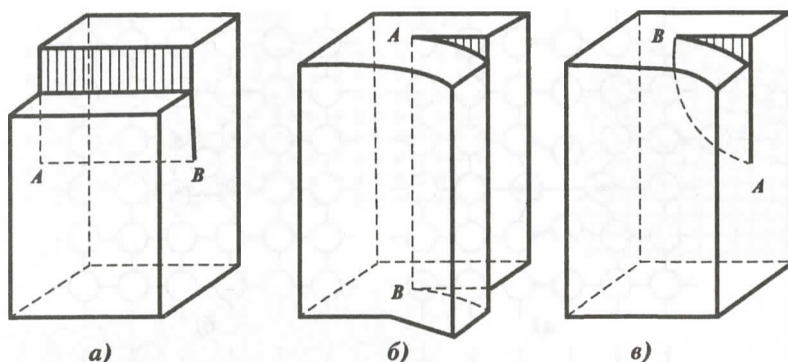


Рис. 1.11. Краевая (а), винтовая (б) и смешанная (в) дислокации в кристалле. Смешанная дислокация в точке А имеет краевую ориентацию, в точке В — винтовую

скольких межатомных расстояний возникают искажения решетки. Энергия искажения кристаллической решетки является одной из важнейших характеристик дислокации любого типа. Критерием служит *вектор Бюргерса*.

Чтобы оценить степень искаженности решетки, вызванной дислокацией, следует сравнить несовершенный кристалл, содержащий дислокацию, с совершенным кристаллом. Для этого строят контур Бюргерса, представляющий собой замкнутый контур произвольной формы, условно выделенный в реальном кристалле путем последовательного обхода дефекта от атома к атому в совершенной области кристалла (рис. 1.12) Вектор Бюргерса b показывает величину и направление сдвига в процессе скольжения.

В краевой дислокации он перпендикулярен к ее линии, а у винтовой — параллелен ей.

Если контур Бюргерса охватывает несколько дислокаций, то величина его соответствует геометрической сумме векторов Бюргерса отдельных дислокаций. Квадрат вектора Бюргерса характеризует энергию дислокаций и силы их взаимодействия.

Дислокации образуются в процессе кристаллизации металлов при «захлопывании» группы вакансий, а также в процессе пластической деформации и фазовых превращений.

1.11. ПОВЕРХНОСТНЫЕ, ИЛИ ПЛОСКИЕ, ДЕФЕКТЫ

Под *поверхностными* (плоскими) *дефектами* подразумевают такие нарушения в кристаллической решетке, которые обладают большой

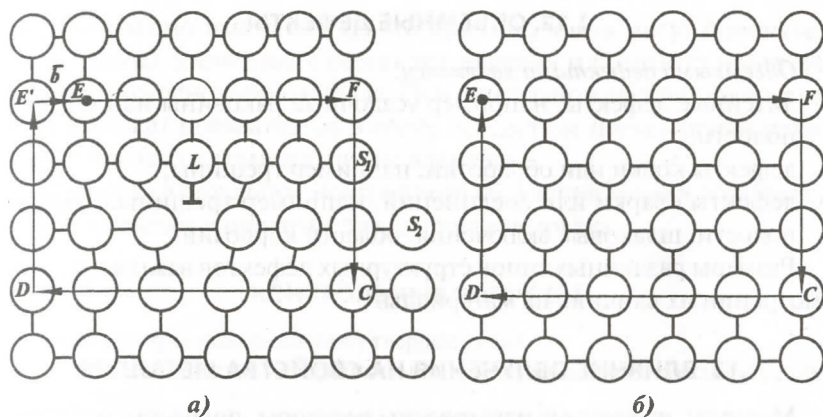


Рис. 1.12. Сечение простой кубической решетки с краевой дислокацией (а) и без дислокации (б)

протяженностью в двух измерениях и протяженностью лишь в несколько межатомных расстояний в третьем измерении.

Такие кристаллические несовершенства могут встречаться в различных физических ситуациях:

- на свободной поверхности между газами и твердыми телами;
- на межфазных границах, когда изменения в структуре и химическом составе встречаются в межфазной поверхности;
- на границах доменов на межфазных поверхностях между областями, содержащими одинаковые атомы;
- на границах зерен;
- на двойниковых границах;
- на локальных нарушениях расположения плотноупакованных поверхностей.

Атомы, которые составляют внешнюю поверхность кристаллической структуры, обладают большей энергией, чем внутренние атомы, поскольку внешние атомы не полностью окружены другими атомами. Примером такого состояния является сферическая форма жидких капель, обладающих минимумом поверхностной энергии на единицу объема.

Атомы в зернах имеют одинаковую упаковку, которая определяется устройством решетки. На границе между двумя соседними зернами атомы не могут располагаться совершенным образом для обеих кристаллических решеток. Существует переходная зона между двумя зернами, где структура отличается от структуры зерен.

1.12. ОБЪЕМНЫЕ ДЕФЕКТЫ

Объемными дефектами являются:

- литейные дефекты, например усадочные раковины или газовые полости;
- дефектыковки или обработки, например трещины;
- дефекты сварки или соединений, например трещины, газовые полости, шлаковые включения, области коррозии.

Размеры различных типов структурных дефектов важны при рассмотрении их влияния на материалы.

1.13. ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ НА СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ

Металлы, из которых изготовлены реакторы, подвергаются облучению различными элементарными частицами, образующимися при работе реактора. Эти частицы, особенно быстрые нейтроны, глубоко проникают внутрь металла и вызывают остаточное изменение его свойств.

Изменение свойств металла обусловлено тем, что внедряющиеся в его кристаллическую решетку элементарные частицы, прежде всего нейтроны, выбивают из регулярных мест в решетке атомы, которые, в свою очередь, могут выбивать другие атомы, попадающие на их пути. Теория показывает, что один нейтрон может вывести из равновесного состояния до 300 атомов алюминия. Такие сильные нарушения в кристаллической решетке создают в ней дефектные места.

Кроме того, дефекты возникают в результате образования термических пиков. Дело в том, что часть энергии нейтронов затрачивается на возбуждение упругих колебаний отдельных групп атомов. Это резко увеличивает температуру в небольшом объеме. Посредством теплопроводности происходит быстрое рассеивание тепла, и металл в этом месте получает локальную закалку, что сильно искажает решетку.

Образование таких дефектов затрудняет перемещение дислокаций и упрочняет металл. В общем, по влиянию на свойства металла ядерное облучение похоже на наклеп.

Так, ядерное облучение, увеличивая прочность простых сталей в 1,5–2 раза, примерно в такой же степени уменьшает их пластичность и вязкость. Эффект ядерного упрочнения металла, подвергнутого предварительно обычным методам упрочнения (наклепу, закалке), меньше, чем в случае неупрочненного, отожженного металла. С повышением температуры эффект ядерного облучения уменьшается, и при температурах выше порога рекристаллизации он практически отсутствует.

Необходимо иметь в виду, что при облучении могут появиться атомы новых элементов в результате деления или захвата нейтрона ядром атома основного металла. При длительном облучении чистый металл может превратиться в сплав вследствие превращения некоторого числа его атомов в другие элементы.

Наконец, в результате нейтронного облучения металл становится радиоактивным и опасным для здоровья человека.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как по строению различают твердые тела?
2. Какие типы связей между атомами и молекулами наиболее сильные или слабые?
3. Какие существуют виды кристаллов и как они различаются по своему строению?
4. Чем аморфные тела отличаются от кристаллических?
5. Какие дефекты встречаются в кристаллических телах?
6. Каковы основные причины возникновения дефектов в металлических кристаллах?
7. Что такое объемные дефекты?
8. Какие дефекты в кристаллической решетке возникают при радиоактивном облучении металлов и как они влияют на их свойства?

Глава 2

КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ

Любое вещество может находиться в трех агрегатных состояниях: газообразном, жидком, твердом. В чистых металлах при определенных температурах происходит изменение агрегатного состояния: твердое состояние сменяется жидким при температуре плавления, жидкое состояние переходит в газообразное при температуре кипения. Температуры перехода зависят от давления, но при постоянном давлении они вполне определены.

2.1. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Переход металла из жидкого или парообразного состояния в твердое с образованием кристаллической структуры называется *первичной кристаллизацией*.

Образование новых кристаллов в твердом кристаллическом веществе называется *вторичной кристаллизацией*.

Процесс кристаллизации складывается из двух одновременно идущих процессов: *зарождения и роста* кристаллов. Кристаллы могут зарождаться (самопроизвольная кристаллизация) или расти (несамопроизвольная кристаллизация) на имеющихся готовых центрах кристаллизации.

Самопроизвольная кристаллизация обусловлена стремлением вещества иметь более устойчивое состояние, характеризующееся уменьшением термодинамического потенциала, называемого *свободной энергией* F :

$$F = U - TS,$$

где U — внутренняя энергия; T — температура; S — энтропия.

С повышением температуры свободная энергия вещества как в твердом, так и в жидком состоянии уменьшается (рис. 2.1).

Температура, при которой свободная энергия в твердом и жидком состояниях равна, называется *равновесной кристаллизацией*. Кристаллизация происходит в том случае, если $F_{\text{тв}}$ в твердом состоянии будет меньше $F_{\text{ж}}$ в жидком состоянии, то есть при переохлаждении жидкого металла до температуры ниже равновесной.

Плавление — процесс, обратный кристаллизации, — происходит при перегреве выше равновесной температуры. Разница между ре-

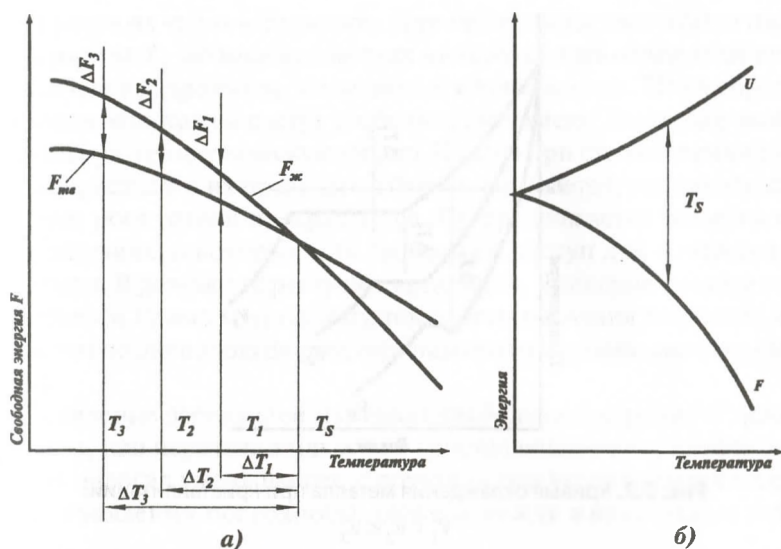


Рис. 2.1. Влияние температуры на свободную энергию жидкой и твердой фаз (а); на внутреннюю и свободную энергии и энтропийный член (б) монокристаллического вещества

альными температурами плавления и кристаллизации называется *температурным гистерезисом*.

Температура, при которой практически начинается кристаллизация, называется *фактической температурой кристаллизации*.

Величиной или степенью переохлаждения называют разность между теоретической и фактической температурами кристаллизации. Обычная степень переохлаждения металлов при кристаллизации в производственных условиях колеблется от 10 до 30 °С; при больших скоростях охлаждения она может достигать сотен градусов. Степень перегрева при плавлении металлов обычно невелика (несколько градусов).

При кристаллизации выделяется теплота. Когда кристаллизуется чистый элемент, отвод тепла, происходящий вследствие охлаждения, компенсируется выделяющейся скрытой теплотой кристаллизации. Поэтому на кривой охлаждения, изображаемой в координатах «температура — время», процессу кристаллизации соответствует горизонтальный участок (рис. 2.2).

У некоторых металлов из-за большого переохлаждения скрытая теплота плавления выделяется в первый момент кристаллизации настолько бурно, что температура скачкообразно повышается, прибли-

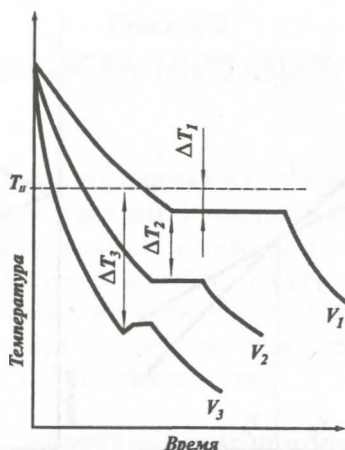


Рис. 2.2. Кривые охлаждения металла при кристаллизации:

$$V_1 < V_2 < V_3$$

жаясь к теоретической (кривая V_3 , рис. 2.2). Так кристаллизуется, например, сурьма.

Чем больше скорость охлаждения, тем больше величина переохлаждения. Для того чтобы полностью переохладить металл в жидком состоянии, требуются большие скорости охлаждения (миллион градусов в секунду). Металл, не имеющий кристаллическую структуру, можно получить, переохладив его за ничтожную долю секунды. Такой металл называется *аморфным* или *металлическим стеклом*.

2.2. МЕХАНИЗМ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

В жидком состоянии атомы вещества вследствие теплового движения перемещаются беспорядочно. В то же время в жидкости имеются сравнительно устойчивые группировки атомов небольшого объема. Эти группировки неустойчивы, рассасываются и вновь появляются в разных местах жидкости. В пределах группировки расположение атомов вещества во многом аналогично их расположению в решетке кристалла. При переохлаждении жидкости некоторые из них, наиболее крупные, становятся устойчивыми и способными к росту. Эти устойчивые группировки атомов называются *центрами кристаллизации* (*зародышами*).

Процесс кристаллизации начинается с образования кристаллических зародышей (центров кристаллизации) и продолжается в про-

цессе роста их числа и размеров. При переохлаждении сплава ниже температуры $T_{пл}$ во многих участках жидкого сплава образуются кристаллические зародыши, называемые *критическими*. Пока образовавшиеся кристаллы растут свободно, они имеют более или менее правильную геометрическую форму. Однако при столкновении растущих кристаллов их правильная форма нарушается, так как на этих участках рост граней прекращается. Он продолжается только в тех направлениях, в которых есть свободный доступ для «питающей» жидкости. В результате растущие кристаллы, имеющие сначала геометрически правильную форму, после затвердевания получают неправильную внешнюю форму; они называются *кристаллитами* (зернами).

Появление зародышей изменяет свободную энергию. С одной стороны, при переходе жидкости в кристаллическое состояние свободная энергия уменьшается, с другой — она увеличивается вследствие появления поверхности раздела между жидкостью и зародышем.

Превращение произойдет тогда, когда выигрыш в энергии от перехода в более устойчивое состояние будет больше потери энергии, идущей на образование поверхности раздела. Другими словами, свободная энергия системы ΔF определяется как сумма двух членов, характеризующих поверхностную $S\sigma$ и объемную $V\Delta F$ энергии:

$$\Delta F = S\sigma - V\Delta F,$$

где S — площадь; σ — поверхностное натяжение; V — объем; ΔF — разность свободных энергий жидкого и кристаллического состояний, приходящаяся на единицу объема.

По мере увеличения зародыша (сферической формы) свободная энергия ΔF изменяется следующим образом:

$$\Delta F = 4\pi r^2 n \sigma - \frac{4}{3}\pi r^3 n \Delta F,$$

где r — радиус частицы новой фазы; n — число частиц.

Исследование этого уравнения показывает, что функция ΔF имеет максимум (рис. 2.3). Зародыш будет расти, если его радиус $r \geq r_{кр}$, так как увеличение размера зародыша приведет к уменьшению ΔF . Таким образом, для данной степени переохлаждения имеется некоторый зародыш критического размера $r_{кр}$. Все зародыши большего размера будут центрами кристаллизации, а зародыши меньшего размера окажутся неустойчивыми и вновь рассосутся в жидкости.

Критический размер связан с термодинамическими параметрами зависимости

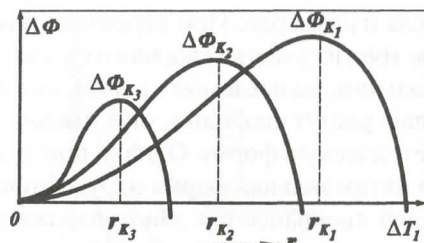


Рис. 2.3. Зависимость $\Delta\Phi$ от r для различных переохлаждений:

$$\Delta T_3 > \Delta T_2 > \Delta T_1$$

$$r_{кр} = \frac{2\sigma}{\Delta F}.$$

В реальных условиях процессы кристаллизации в значительной мере зависят от имеющихся готовых центров кристаллизации. Такими центрами могут быть твердые частицы разнообразных примесей, стенки формы. Особенно эффективны частицы таких веществ, которые по своему кристаллическому строению похожи на затвердевающий металл. Это сходство проявляется в близком соответствии расположения атомов на определенных плоскостях решеток металла и примеси.

Растворенные в металле примеси способствуют увеличению числа центров, если примеси будут поверхностно-активными веществами, понижающими поверхностное натяжение. В этом случае уменьшается критический размер зародыша, что эквивалентно увеличению степени переохлаждения.

2.3. ФОРМА КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗОВАНИЙ

Расплавленные металлы, как правило, кристаллизуются без значительного переохлаждения. Для кристаллизации из раствора необходимо выполнить два условия:

- создать переохлаждение, то есть охладить раствор ниже температуры равновесной кристаллизации;
- создать в растворе один или несколько центров кристаллизации.

Следует реализовать особые условия, чтобы жидкость затвердела в один кристалл с идеальной структурой — монокристалл.

Чаше результатом кристаллизации являются не моно-, а поликристаллы.

Форма зерен, образующихся при кристаллизации, зависит от условий их роста, главным образом от скорости и направления

отвода теплоты и температуры жидкого металла, а также от примесей. В направлении отвода теплоты кристалл растет быстрее, чем в другом направлении. В результате образуется древовидный кристалл, так называемый *дендрит*, схема которого показана на рис. 2.4. Дендриты часто образуются при кристаллизации сплавов. Дендритное строение типично для литого металла. Установлено, что наибольшая скорость роста кристаллов наблюдается по таким плоскостям и направлениям решетки, которые имеют наибольшую плот-

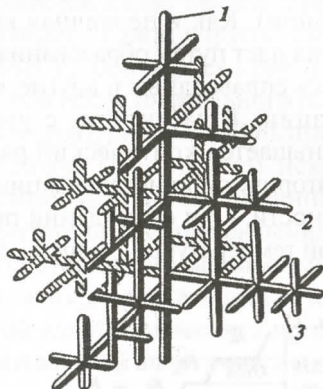


Рис. 2.4. Схема дендритного роста кристалла:

1 — ось первого порядка; 2 — ось второго порядка; 3 — ось третьего порядка

ность упаковки атомов. В результате вырастают длинные ветви, которые называются *осями первого порядка*. Затем на этих осях появляются и начинают расти ветви второго порядка и т.д.

Одновременно идет кристаллизация в участках между осями дендритов. Дендриты растут до тех пор, пока не соприкоснутся друг с другом. После этого окончательно заполняются межосные пространства, и дендриты превращаются в полновесные кристаллы с неправильной внешней огранкой. Такие кристаллы называются *зернами* или *кристаллитами*. На границах между зернами в участках между осями дендритов накапливаются примеси, появляются поры из-за усадки и трудностей подхода жидкого металла к фронту кристаллизации. Условия отвода теплоты при кристаллизации значительно влияют на форму зерен. Это видно на примере кристаллизации стального слитка.

Дендритообразование характерно для веществ, мало склонных к переохлаждению и имеющих большую скорость кристаллизации. В противном случае от центров кристаллизации равномерно по всем

направлениям растут кристаллические иголки, образуя так называемые сферолиты.

2.4. ВТОРИЧНАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ

Вторичной кристаллизацией называется процесс, в результате которого происходит полная замена одной кристаллической структуры на другую (аллотропическое превращение) или частичное изменение структуры (выделение новой фазы из твердого раствора при изменении его концентрации). Как и первичная кристаллизация, вторичная кристаллизация идет путем образования центров кристаллизации и их роста. Здесь справедливы и другие закономерности первичной кристаллизации. В частности, с увеличением степени переохлаждения уменьшается критический размер зародыша. Однако для процессов вторичной кристаллизации характерны и свои, присущие им особенности. При охлаждении превращение начинается ниже равновесной температуры T_s и идет с выделением теплоты,

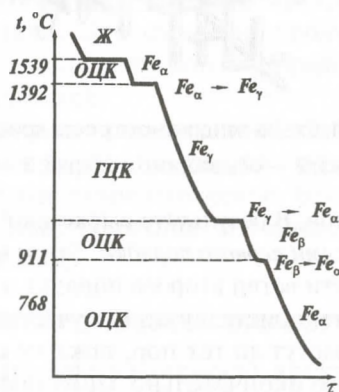


Рис. 2.5. Кривая охлаждения чистого железа

при нагреве оно наступает выше T_s и протекает с поглощением тепла. На кривой охлаждения (нагрева) чистого металла аллотропическому превращению соответствует остановка. На рис. 2.5 приведена кривая охлаждения чистого железа.

Поскольку кристаллическая решетка каждой аллотропической модификации обладает определенной присущей ей плотностью, превращение сопровождается изменением объема и возникновением внутренних напряжений.

Например, аллотропическое превращение белого олова с плотностью $7,3 \text{ г/см}^3$ в серое с плотностью $5,7 \text{ г/см}^3$ вызывает разрушение серого олова в порошок.

Механизм роста новой модификации может быть нормальным и мартенситным.

Нормальный механизм роста кристаллов присущ металлам с высокой температурой аллотропического превращения (Fe, Ti, Zr) при условии их медленного охлаждения. В этом случае реализуется небольшая степень переохлаждения, превращение происходит, когда металл пластичен, обладает малой упругостью и большой подвижностью атомов. В таких условиях рост кристаллов новой модификации происходит путем последовательного перехода к ним атомов от исходной высокотемпературной модификации. Новая фаза зарождается на границах блоков. Пластичность исходной модификации соответствует релаксации упругих напряжений, возникающих при превращении. В результате такого превращения образуются полиэдрические структуры, состоящие из равноосных кристаллов.

Мартенситный механизм роста кристаллов присущ металлам с низкой температурой аллотропического превращения (Co). В металлах с высокой температурой аллотропического превращения (Fe, Ti, Zr) он наблюдается при больших переохлаждениях, то есть также при низких температурах.

При мартенситном превращении Fe_γ в Fe_α подавляется диффузия углерода. В результате получается мартенсит, значительно пересыщенный углеродом, отличающийся от безуглеродистого более высокой прочностью и твердостью.

Таким образом, аллотропия позволяет изменять структуру и свойства металлов, особенно сплавов, путем нагрева выше температуры аллотропических (фазовых) превращений и охлаждения с различными скоростями, иначе говоря, при помощи термической обработки.

Превращение, при котором осуществляется мартенситный механизм, называется *мартенситным превращением*, а образующаяся при этом фаза — *мартенситом*.

Большое научное и практическое значение имеют монокристаллы. Металлы в монокристаллическом состоянии отличаются высокой степенью чистоты и минимальными структурными несовершенствами. Получение монокристаллов позволяет изучить истинные свойства металлов, исключить влияние границ зерен. Применение в монокристаллическом состоянии германия и кремния высокой чистоты дает возможность использовать их свойства полу-

проводников и свести к минимуму неконтролируемые изменения электрических свойств. Монокристаллические лопатки авиационных двигателей позволяют повысить их надежность и ресурс работы.

Монокристаллы можно получить, если создать условия для роста кристалла только из одного центра кристаллизации.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое равновесная кристаллизация?
2. Каковы условия перехода металла из жидкого состояния в твердое?
3. Какие факторы обуславливают форму зерен при кристаллизации металла?
4. Каковы особенности вторичной кристаллизации?
5. Какие свойства имеют монокристаллы и каковы условия их получения?

Глава 3

СТРОЕНИЕ СПЛАВОВ

3.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЛАВА

Чистые металлы находят довольно ограниченное применение. Их используют главным образом в электрорадиотехнике (проводниковые, электровакуумные и другие материалы). Основными конструкционными материалами являются металлические сплавы.

Преимущественное использование в технике металлических сплавов объясняется тем, что они обладают более ценными, чем чистые металлы, комплексами механических, физических и технологических свойств.

Сплавом называется вещество, полученное сплавлением двух или более элементов. Сплав, приготовленный преимущественно из металлических элементов и обладающий металлическими свойствами, называется *металлическим сплавом*. Металлические сплавы можно получать плавлением, методом порошковой металлургии, диффузией, возгонкой, электролизом и другими методами.

К основным понятиям в теории сплавов относятся система, компонент, фаза.

Система — группа тел, выделяемых для изучения и наблюдений. В металловедении системами являются металлы и металлические сплавы. Чистый металл является простой системой. Сплавы из двух или более составляющих элементов являются сложными системами.

Компоненты сплава — это вещества, образующие систему. В металлических сплавах компонентами могут быть элементы (металлические и неметаллические) и химические соединения (не диссоциирующие при нагревании).

Фазой называется однородная часть системы, отделенная от другой части системы (фазы) поверхностью раздела, при переходе через которую химический состав или структура изменяются скачком. В твердых сплавах фазами могут быть зерна чистого металла, зерна твердого раствора и зерна химического соединения.

Почти все металлы в жидком состоянии растворяются один в другом в любых соотношениях. В результате растворения образуется однородный жидкий раствор с равномерным распределением атомов одного металла среди атомов другого металла. Лишь очень немногие металлы, главным образом сильно различающиеся разме-

рами атомов, не растворяются в жидком состоянии, а если и растворяются, то ограниченно.

При образовании сплавов в процессе их затвердевания возможны различные взаимодействия входящих в них компонентов, что обуславливает разное строение сплавов.

3.2. МЕХАНИЧЕСКАЯ СМЕСЬ

Механическая смесь образуется после кристаллизации сплава, если в процессе кристаллизации сила взаимодействия между однородными атомами окажется больше силы взаимодействия между разнородными атомами. В этом случае в твердом сплаве будут присутствовать зерна одного чистого металла и рядом с ними — зерна другого чистого металла. Такая фаза возникает при большом различии в свойствах входящих в сплав металлов.

3.3. ТВЕРДЫЕ РАСТВОРЫ

Твердые растворы — это такие твердые вещества, в которых соотношения между компонентами могут изменяться. В твердом растворе, так же как и в чистых металлах, атомы в пространстве расположены закономерно, образуя кристаллическую решетку. Этим твердые растворы отличаются от жидких растворов. В твердом растворе один из входящих в него компонентов сохраняет присущую ему кристаллическую решетку, а второе вещество, утратив свое кристаллическое строение, в виде отдельных атомов распределяется в кристаллической решетке первого. Первое вещество называется *растворителем*, второе — *растворимым*.

Твердые растворы обозначают буквами греческого алфавита: α , β , γ .

В зависимости от характера распределения атомов растворимого элемента различают твердые растворы внедрения или замещения. Независимо от типа твердого раствора общим для них является то, что они однофазны и существуют в интервале концентраций. Для твердых растворов характерен металлический тип связи.

В *твердых растворах внедрения* атомы растворимого элемента распределяются в кристаллической решетке металла-растворителя, занимая место между его атомами (рис. 3.1, б). Поскольку у металлов атомы в кристаллической решетке располагаются близко один к другому и пустоты имеют малые размеры, разместиться в таких пустотах могут только атомы с очень малыми размерами.

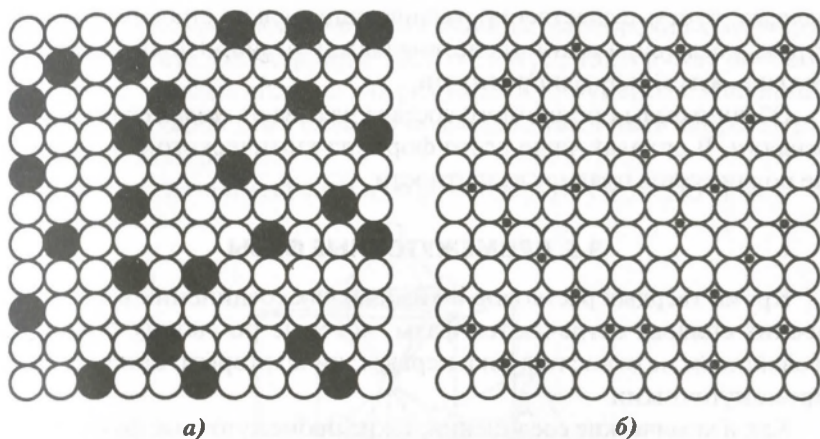


Рис. 3.1. Атомно-кристаллическая структура твердого раствора (схема):

а — твердый раствор замещения; *б* — твердый раствор внедрения

Наименьшие размеры атомов имеют некоторые металлоиды — водород, азот, углерод, бор, которые и образуют с металлами твердые растворы внедрения. Но и у этих элементов размеры атомов несколько превышают размеры межатомных промежутков в кристаллической решетке металлов. Поэтому при образовании твердых растворов внедрения решетка искажается, и в ней возникают напряжения. При этом концентрация твердого раствора внедрения не может быть высокой: она редко превышает 1–2%.

В *твердых растворах замещения* атомы растворимого элемента занимают место атомов основного металла (рис. 3.1, *а*). Посторонние атомы могут замещать атомы растворителя в любых местах, поэтому такие растворы называют *неупорядоченными твердыми растворами*. Размеры атомов растворимого элемента всегда отличаются от размеров атома растворителя (они больше или меньше), поэтому при образовании твердого раствора замещения кристаллическая решетка металла-растворителя немного искажается, не утрачивая при этом своего основного строения. Твердые растворы замещения могут быть ограниченными и неограниченными. Одно из условий неограниченной растворимости — размерный фактор: чем больше различие в атомных радиусах, тем меньше растворимость.

3.4. ХИМИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ

Химические соединения чаще всего образуются между элементами, расположенными далеко один от другого в таблице Д.И. Мен-

делева, то есть существенно различающимися по строению и свойствам, когда сила взаимодействия между разнородными атомами больше, чем между однородными.

Обычно фазы постоянного состава называют *химическими соединениями*. В сплавах чаще всего формула химического соединения не подчиняется правилу валентности.

3.5. ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ ФАЗЫ

Кроме твердых растворов и химических соединений в металлических сплавах встречаются фазы, которые по своему строению и свойствам не относятся ни к первым, ни ко вторым; они являются промежуточными.

Как и химические соединения, такие промежуточные фазы имеют свою, отличную от образующих их компонентов кристаллическую решетку, но в то же время они могут существовать в интервале концентраций, как твердые растворы.

Промежуточные фазы могут быть постоянного и переменного состава.

Промежуточные фазы многочисленны и разнообразны. Эти соединения не подчиняются закону валентности. Рассмотрим некоторые из них.

Интерметаллиды — соединения между металлами (например, CuAl_2 , MoFe_2 , Ni_3Ti и др.).

Металлические соединения — это фазы с металлическим типом связи. Такие фазы образуются при взаимодействии переходных металлов с C, N, H, которые называются соответственно карбидами, нитридами, гидридами. Кристаллическая структура этих соединений зависит от относительных размеров атомов неметалла $R_{\text{нм}}$ и атомов металла $R_{\text{м}}$. Если отношение $R_{\text{нм}}/R_{\text{м}} < 0,59$, образуются промежуточные фазы с простыми пространственными решетками. Подобные промежуточные фазы называются *фазами внедрения*.

Если $R_{\text{нм}}/R_{\text{м}} > 0,59$, образуются сложные пространственные решетки с большим числом атомов в элементарной ячейке.

Химический состав фаз внедрения указывается формулами: MX , M_2X , M_4X и MX_4 , где M — металл; X — неметалл.

К фазам внедрения типа MX относятся следующие карбиды: TiC , NbC , WC , MoC , VC . Примером типа M_4X является Fe_4N , а фазы типа MX_4 — гидрид циркония ZrH_4 .

Фазы внедрения — это самые тугоплавкие и твердые промежуточные фазы. Карбиды, относящиеся к фазам внедрения, присут-

ствуют в структуре многих коррозионноустойчивых, жаропрочных и инструментальных сталей. Карбиды TiC , WC , W_2C , TaC служат основой спеченных твердых сплавов для режущих инструментов. Использование таких карбидных сплавов позволило увеличить скорость резания в десятки раз.

Карбид железа имеет сложную ромбическую структуру (рис. 3.2).

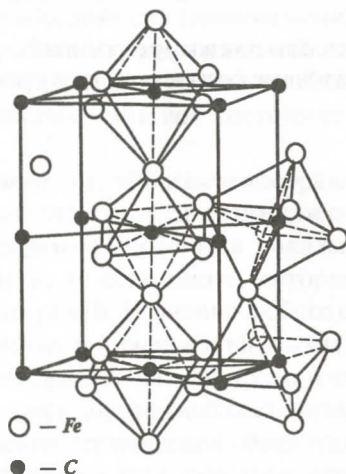


Рис. 3.2. Кристаллическая структура карбида железа Fe_3C

Эти промежуточные фазы отличаются высокой твердостью и хрупкостью, они также достаточно тугоплавки, но уступают по этим свойствам карбидам, являющимся фазами внедрения.

Электронные соединения характеризуются определенным отношением числа валентных электронов к числу атомов (электронной концентрацией) и образуются при взаимодействии металлов 1-го класса (Cu , Ag , Au , Mn , Fe , Co , Ni) с металлами 2-го класса (Zn , Al , Sn , Si , Mg , Cd и др.). Подобные соединения встречаются во многих важных технических сплавах ($Cu + Zn$), ($Cu + Sn$), ($Fe + Al$), ($Cu + Si$) и т.д.

Обычно в системе наблюдаются следующие фазы:

- β -фаза, электронная концентрация которой равна $2/3$, решетка ОЦК — $CuZn$, $CuBe$, Cu_3Al , Cu_5Sn , $AgMg$ и др.;
- γ -фаза, электронная концентрация которой равна $21/13$, решетка сложная кубическая — Cu_5Zn_8 , $Cu_{31}Sn_8$, Fe_5Zn_{21} и др.;
- Σ -фаза, электронная концентрация которой равна $7/4$, решетка ГПУ — Cu_3Sn , Ag_5Al_3 , $CuZn_3$, $AuCd_3$ и т.д.

Электронные соединения могут образовывать с компонентами, из которых они состоят, твердые растворы в широком интервале концентрации.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему в технике наибольшее применение получили сплавы, а не металлы?
2. Как различаются сплавы по своему строению?
3. Что такое промежуточные фазы и каковы их свойства?

Глава 4

ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ

4.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ

Сплавы называют *однородными (гомогенными)*, если структура их однофазная, и *разнородными (гетерогенными)*, если структура их состоит из нескольких фаз. Для сплавов, образованных одними и теми же компонентами, фазовое состояние описывается диаграммой состояния.

Диаграмма состояния — графическое изображение состояния любого сплава изучаемой системы в зависимости от его концентрации и температуры. Диаграмма состояния показывает равновесные, устойчивые состояния, то есть такие, которые обладают минимальной свободной энергией. Изучение любого сплава прежде всего начинается с построения и анализа диаграммы состояния, так как именно она дает возможность изучать фазы и структурные составляющие сплава. Пользуясь диаграммой состояния, можно установить возможность проведения термической обработки и ее режимы, температуры литья, горячей пластической деформации и т.д.

4.2. ПРАВИЛО ФАЗ

Правило фаз устанавливает температурные условия процесса кристаллизации при заданном давлении, а также определяет, сколько фаз должно быть в чистом компоненте или в сплаве определенного состава, если они находятся в равновесном состоянии при данной температуре (или давлении). Число факторов, которые можно менять, не изменяя фазового состава сплава, называется *степенью свободы*.

Правило фаз выражает зависимость между числом степеней свободы S (вариантностью) системы, числом компонентов K и числом фаз Φ системы, находящихся в равновесии (рис. 4.1).

Обычно все превращения в металлах и сплавах происходят при постоянном давлении (атмосферном). Тогда правило фаз записывается так:

$$S = K - \Phi + 1.$$

Уравнение правила фаз позволяет корректировать правильность построения диаграмм состояния.

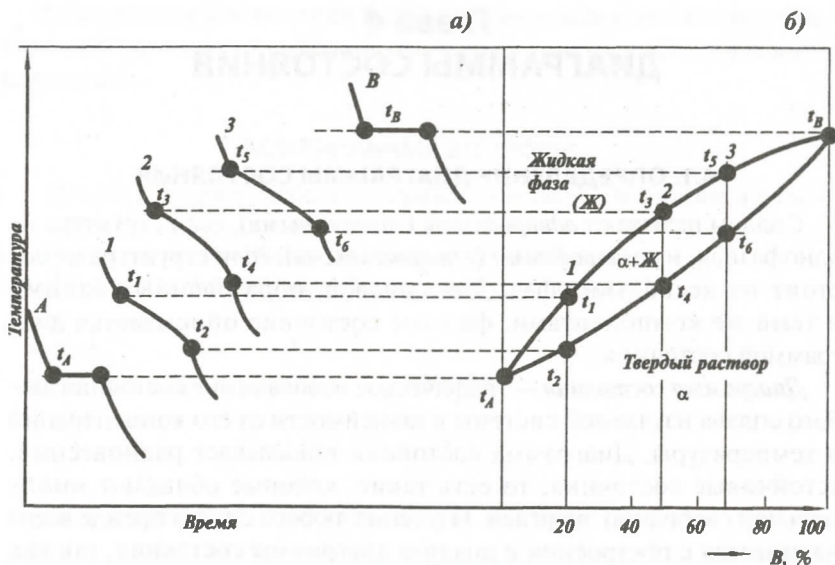


Рис. 4.1. Построение диаграммы состояния для случая неограниченной взаимной растворимости компонентов А и В:

а — кривые охлаждения; б — диаграмма состояния

Построение диаграмм состояния осуществляют экспериментальными методами. Наиболее часто пользуются методом термического анализа. Сущность этого метода заключается в следующем. Отбирают несколько сплавов данной системы с различным отношением масс входящих в них компонентов. Сплавы помещают в огнеупорные тигли и нагревают в печи. После расплавления сплавов тигли с ними медленно охлаждают и фиксируют скорость охлаждения. По полученным данным строят термические кривые в координатах «время — температура» (рис. 4.1).

В результате измерений получают серию кривых охлаждения, на которых при температурах фазовых превращений наблюдаются точки перегиба и температурные остановки.

Температуры, соответствующие фазовым превращениям, называются **критическими точками**.

Точки, соответствующие началу кристаллизации, называют **точками ликвидуса**, а конца кристаллизации — **точками солидуса**.

По полученным кривым охлаждения (критическим точкам) для различных сплавов изучаемой системы строят диаграмму состояния в координатах: ось абсцисс — концентрация компонентов, ось ординат — температура.

Вид диаграммы состояния определяется характером взаимодействий, которые возникают между компонентами в жидком и твердом состояниях. Во всех случаях предполагают, что в жидком состоянии существует неограниченная растворимость, то есть однородная фаза существует при любом соотношении компонентов.

Диаграммы с ограниченной растворимостью или с полным отсутствием растворимости в жидком состоянии практического значения не имеют, так как сплавы этих систем мало применяются в технике.

4.3. ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ СПЛАВОВ, ОБРАЗУЮЩИХ НЕОГРАНИЧЕННЫЕ ТВЕРДЫЕ РАСТВОРЫ

Полная взаимная растворимость металлов в твердом состоянии возможна лишь для изоморфных металлов. При их сплавлении образуется непрерывный ряд твердых растворов замещения. Например, имеются компоненты A и B ; фазы — жидкий раствор $Ж$ и твердый раствор α . Температура охлаждающегося чистого компонента A понижается до t_A (рис. 4.1, a , кривая A), при которой компонент A затвердевает. На кривой отмечается остановка (горизонтальная линия), так как согласно правилу фаз в этом случае при постоянной температуре могут сосуществовать только две фазы — твердая и жидкая ($C = 1 + 1 - 2 = 0$). После затвердевания компонента A , когда $\Phi = 1$, температура снова понижается. Аналогично может быть рассмотрена кристаллизация и компонента B (рис. 4.1, a , кривая B).

При охлаждении сплава 1 температура понижается до t_1 (рис. 4.1, a). При температуре t_1 начинается процесс кристаллизации, и на кривой охлаждения отмечается перегиб (критическая точка), связанный с уменьшением скорости охлаждения вследствие выделенной скрытой теплоты кристаллизации.

Начиная с температуры t_1 из жидкого сплава кристаллизуется твердый раствор α . Процесс кристаллизации протекает при понижающейся температуре, так как согласно правилу фаз в двухкомпонентной системе при наличии двух фаз (жидкой и кристаллов твердого раствора α) число степеней свободы равно единице ($C - 2 + 1 - 2 = 1$).

При температуре t_2 сплав затвердевает, и при более низких температурах существует только α -твердый раствор. Аналогично затвердевают и другие сплавы (например, 2 и 3) этой системы.

Если найденные критические точки от t_1 до t_2 перенести на диаграмму, где по оси абсцисс нанесен состав сплава, а по оси ординат — температура, и одноименные критические точки соединить плав-

ными кривыми, то получается диаграмма состояния системы сплавов *A* и *B*, образующих непрерывный ряд твердых растворов (рис. 4.1, б).

Начало затвердевания сплавов происходит при температурах, соответствующих линии ликвидус $t_A t_B$. Температура окончания кристаллизации соответствует линии солидус t_A .

В интервале температур между линиями ликвидус и солидус существуют две фазы — жидкий сплав и твердый раствор.

Линии $m_2 n_2$ и $m_3 n_3$ и другие, соединяющие составы фаз в равновесии, называются *конодами* (рис. 4.2).

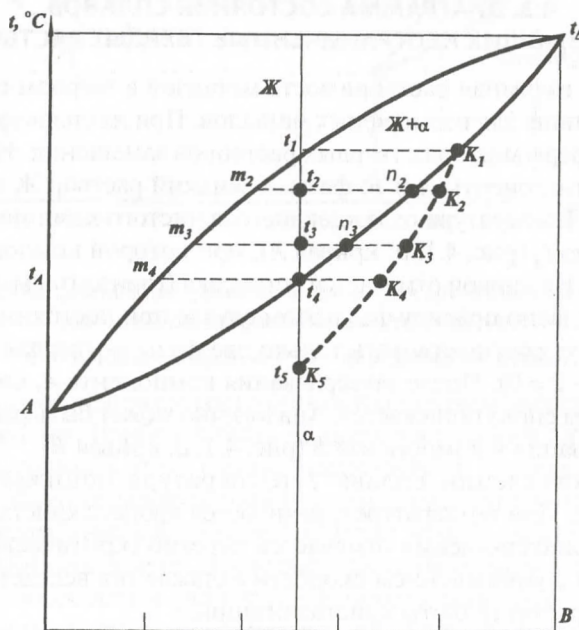


Рис. 4.2. Диаграмма состояния для случая неограниченной растворимости компонентов *A* и *B*

Пользуясь диаграммой состояния, можно для любой температуры определить не только число фаз, но и их состав и количественное соотношение.

Правило отрезков позволяет определять это соотношение. Оно может быть использовано только для двухфазной области диаграммы состояния. Согласно этому правилу необходимо вычислить отношение длины отрезка, примыкающего к составу жидкой фазы, к длине всей коноды, что показывает массовое, или объемное, количество твердой фазы. Для определения количества жидкой фазы вы-

числяется отношение длины отрезка, примыкающего к составу твердой фазы, к длине коноды.

Следовательно, количество твердой фазы при температуре t_2 определится отношением отрезка t_2m_2 к длине коноды m_2n_2 , %:

$$\alpha = \frac{t_2m_2}{m_2n_2} \cdot 100;$$

количество жидкой фазы:

$$\text{Ж} = \frac{t_2n_2}{m_2n_2} \cdot 100.$$

Неравновесная кристаллизация. В реальных условиях охлаждения состав в пределах каждого кристалла и разных кристаллов не успевает выравниваться, и он не будет одинаковым (рис. 4.2).

При температуре t_2 состав жидкой фазы будет соответствовать точке m_2 , а α -фазы — точке n_2 . Но отдельные части кристаллов α -фазы, которые образовались при температуре выше t_2 , не изменили своего начального состава, и средний состав кристаллов будет соответствовать точке K_2 . При понижении температуры средний состав кристаллов α -твердого раствора все более отклоняется от равновесного. При температурах t_3 он будет соответствовать не n_3 , а K_3 . Если через точки K_1-K_5 провести кривую, то она будет характеризовать средний состав кристаллов α при данной скорости охлаждения. При температурах t_4 в условиях равновесия фаз выбранный сплав должен затвердеть. В неравновесных условиях этого не произойдет, так как в сплаве останется жидкая фаза, количество которой определится из соотношения (t_4K_4/m_4K_4) . Сплав затвердеет тогда, когда средний состав α -фазы будет соответствовать составу взятого сплава. Это произойдет при температуре t_5 , когда периферийные зоны кристаллов будут иметь состав, включающий 50% компонента B . Следовательно, в неравновесных условиях сплав затвердевает ниже равновесной температуры затвердевания. Линию K_1-K_5 называют *линией неравновесного солидуса*. Каждый сплав при заданной скорости охлаждения характеризуется своим неравновесным солидусом.

Скорость приращения твердой фазы при понижении температуры называется *темпом кристаллизации*.

Дендритная (внутрикристаллитная) ликвация. В результате неравновесной кристаллизации химический состав образующихся кристаллов α -твердого раствора по сечению оказывается переменным.

В процессе кристаллизации образуются кристаллы твердого раствора дендритного типа. Поэтому оси первого порядка, возник-

кающие в начальный момент кристаллизации, обогащены более тугоплавким компонентом *В*. Периферийные слои кристаллов и межосные пространства, кристаллизующиеся в последнюю очередь, будут обогащены компонентом *А*, понижающим температуру плавления сплава, и их состав близок к концентрации, соответствующей исходной концентрации сплава. Такую неоднородность состава сплава внутри отдельных кристаллов называют *внутрикристаллитной* или *дендритной ликвацией*.

Чем больше температурный интервал кристаллизации сплава, то есть чем больше расстояние между линиями ликвидуса и солидуса, тем больше проявляется дендритная ликвация.

Дендритная ликвация может быть ослаблена продолжительным нагревом сплава при температурах, обеспечивающих достаточную скорость диффузии ($0,8-0,9 T_{пл}$). После такого нагрева, называемого *диффузионным отжигом* или *гомогенизацией*, дендритная ликвация литого сплава уменьшается.

Зональная ликвация. Кроме внутрикристаллитной ликвации химическая неоднородность также образуется по зонам слитка; такую неоднородность называют *зональной ликвацией*.

Зональная ликвация по сечению слитка бывает прямой и обратной. При прямой зональной ликвации поверхностные зоны слитка обогащены компонентом, повышающим температуру плавления, а центральные зоны слитка содержат больше компонента, понижающего эту температуру. При обратной ликвации наблюдается противоположная закономерность. Развитие зональной ликвации зависит от скорости охлаждения, размера слитка, скорости диффузии, интервала температур кристаллизации и т.д. Обычно чем больше развита дендритная ликвация, тем меньше зональная ликвация. Для ослабления зональной ликвации применяют высокие скорости охлаждения, так как при этом развивается дендритная ликвация.

4.4. ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ СПЛАВОВ, ОБРАЗУЮЩИХ МЕХАНИЧЕСКИЕ СМЕСИ ЧИСТЫХ КОМПОНЕНТОВ

Компоненты *А* и *В*; фазы — жидкий расплав; кристаллы *А* и *В*. Диаграмма состояния для случая, когда компоненты *А* и *В* взаимно неограниченно растворимы в жидком состоянии и нерастворимы в твердом состоянии и при этом не образуют химических соединений, дана на рис. 4.3. Выше линии *АСВ*, называемой линией ликвидус, все сплавы находятся в жидком состоянии, ниже линии *DCE*,

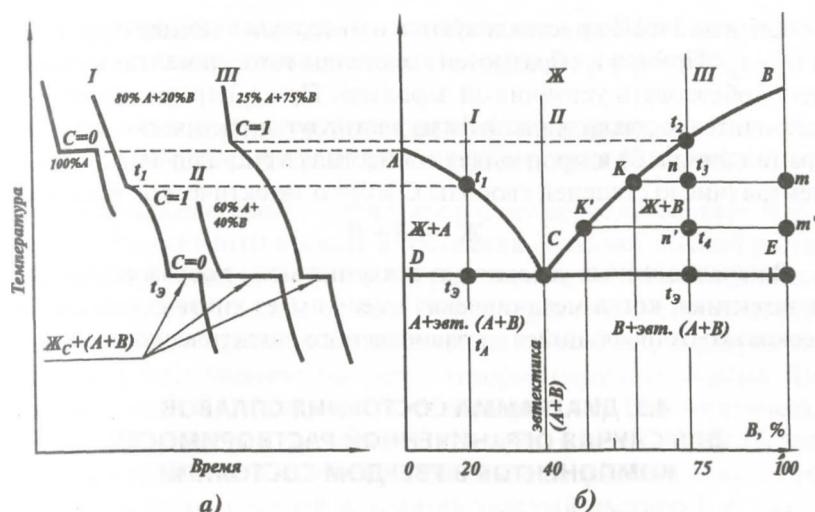


Рис. 4.3. Диаграмма состояния сплавов, образующих в твердом состоянии механические смеси:

а — кривые охлаждения; б — диаграмма состояния

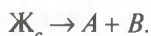
называемой линией солидус, — в твердом, между ними — в двух-фазном состоянии.

Рассмотрим кристаллизацию сплавов I, II, III, отличающихся содержанием компонентов A и B . Температуры начала кристаллизации у них различные, но заканчивают кристаллизацию они при одной температуре t_3 .

Кривая кристаллизации сплава II аналогична кривым охлаждения чистых металлов, но температура плавления сплава ниже, чем у образующих его компонентов. Особенность кристаллизации заключается в том, что кристаллизация обоих компонентов происходит одновременно, то есть одновременно появляются и растут кристаллы компонентов A и B , и таким образом образуется мелкокристаллическая смесь обоих компонентов.

Механическая смесь двух (или более) разнородных кристаллов, одновременно кристаллизующихся из жидкости определенного химического состава при постоянной и минимальной для сплавов данной системы температуре, называется *эвтектикой*. Химический состав эвтектической смеси определенных компонентов всегда одинаков (определяется точкой C на рис. 4.3). Для этого случая по правилам фаз имеем: $K = 2$ (A и B); $\Phi = 3$ (жидкость кристаллов A и B); $C = 2 + 1 - 3 = 0$.

Сплавы I и III кристаллизуются в интервалах температур ($t_1 - t_3$) и ($t_2 - t_3$). При t_1 и t_2 образуются кристаллы того элемента, которому легче образовать устойчивый зародыш. При t_3 перераспределение закончится, остатки жидкой фазы достигнут эвтектической концентрации (точка C) и произойдет совместная кристаллизация компонентов (число степеней свободы $C = 0$) по эвтектической реакции



В неравновесных условиях охлаждения может образоваться квазиэвтектика, когда механическая смесь имеет химический состав, несколько отличающийся от равновесного эвтектического.

4.5. ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ СПЛАВОВ ДЛЯ СЛУЧАЯ ОГРАНИЧЕННОЙ РАСТВОРИМОСТИ КОМПОНЕНТОВ В ТВЕРДОМ СОСТОЯНИИ

Компоненты A и B такой системы обладают в жидком состоянии неограниченной растворимостью, а в твердом — ограниченной, меняющейся в зависимости от температуры. На рис. 4.4 изображена диаграмма такой системы.

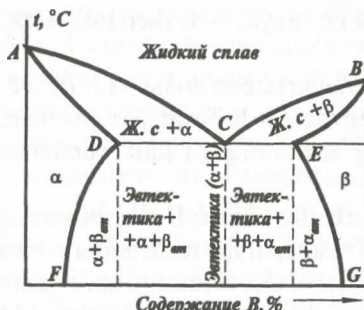


Рис. 4.4. Диаграмма состояния сплава из двух элементов для случая ограниченной растворимости компонентов в твердом растворе

Выше линии ACB (ликвидус) расположена область жидкого сплава. Линия ADCEB — солидус, линия DCE — линия эвтектического превращения, точка C — эвтектическая точка. Области ниже линий AD и BE отвечают соответственно твердым растворам α и β . При понижении температуры в застывшей системе происходит процесс выделения кристаллов твердого раствора, из которого затем выделяются кристаллы другого раствора. Этот процесс носит название *вторичной кристаллизации*. В интервале от точки D до точки E затвердевание происходит согласно диаграмме системы элементов,

образующих механическую смесь. В точке *C* образуется эвтектика, состоящая из смеси компонентов твердых растворов α и β .

4.6. ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ СПЛАВОВ ДЛЯ СЛУЧАЯ ПЕРИТЕКТИЧЕСКОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ

Слово *перитектика* — греческое и означает «окружение». В этой системе компоненты в жидком состоянии обладают полной растворимостью, а в твердом состоянии растворимы частично. Выпавшие из жидкости кристаллы одного твердого раствора (строго определенного состава), реагируя с оставшейся жидкостью, образуют кристаллы другого твердого раствора, которые окружают первые. Диаграмма такой системы изображена на рис. 4.5. Перитектическое превращение происходит при температурах, соответствующих горизонтальной линии *CDE*, называемой линией перитектического превращения, выше которой находятся твердый раствор *P* и жидкий сплав. Перитектическое превращение протекает очень медленно и в технических сплавах обычно не доходит до конца.

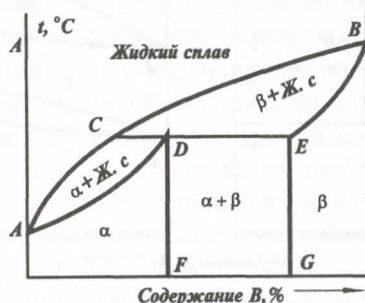


Рис. 4.5. Диаграмма состояния сплавов для случая перитектического превращения

4.7. ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ СПЛАВОВ ДЛЯ СЛУЧАЯ ОБРАЗОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОЕДИНЕНИЯ

На рис. 4.6 изображена диаграмма состояния сплавов, компоненты которых образуют устойчивое химическое соединение, рассматриваемое как самостоятельный компонент, образующий с компонентами *A* и *B* простейшие диаграммы состояния. На приведенной диаграмме левая часть представляет случай отсутствия растворимости компонентов в твердом растворе, а правая — случай полной растворимости.



Рис. 4.6. Диаграмма состояния сплавов для случая образования химического соединения

Существуют еще диаграммы так называемого аллотропического превращения, изображенные на рис. 4.7, а, б. Подобные диаграммы характерны для сплавов железа, титана.

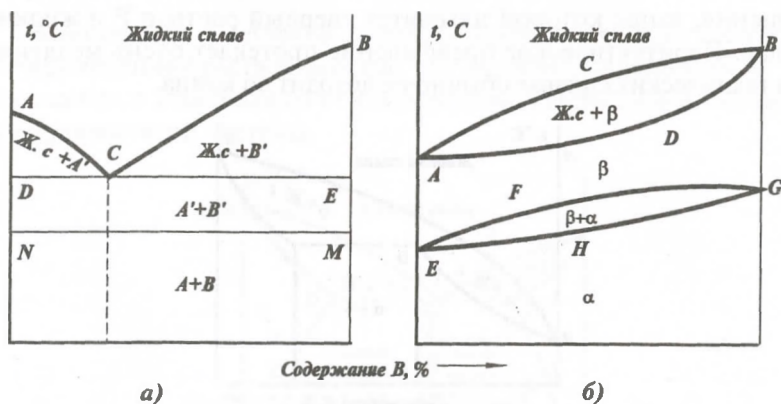


Рис. 4.7. Диаграмма аллотропического превращения

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие зависимости устанавливают с помощью правила фаз?
2. Каким образом по диаграмме состояния сплавов можно определить количество жидкой и твердой фаз?
3. Каковы отличия дендритной и зональной ликваций, а также факторы, влияющие на их величину?
4. Назовите основные типы диаграмм состояния сплавов.
5. Какова связь свойств сплавов с типом диаграмм состояния?

Раздел II ПЛАСТИЧНОСТЬ И ПРОЧНОСТЬ МЕТАЛЛОВ

Глава 5 ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЛАСТИЧНОСТИ И ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛОВ

5.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Под *механическими свойствами* понимают характеристики, определяющие поведение материала под действием приложенных внешних механических сил. Основными механическими свойствами являются прочность, пластичность, упругость, вязкость, твердость. Зная их, конструктор при проектировании обоснованно выбирает соответствующий материал, обеспечивающий надежность и долговечность машин и конструкций при их минимальной массе.

В результате механических испытаний получают числовые значения механических свойств, то есть значения напряжений или деформаций, при которых происходят изменения физического и механического состояний материала.

Наличие металлической связи придает металлу способность к пластической деформации и к самоупрочнению в результате пластической деформации. Поэтому если внутри материала есть дефект или имеются концентраторы напряжений, то в этих местах напряжения достигают большой величины и даже может возникнуть трещина. Но так как пластичность металла высока, то в таком месте, в том числе в устье трещины, металл пластически деформируется, упрочняется, и процесс разрушения приостанавливается.

Деформацией называется изменение формы и размеров тела под действием напряжений. Напряжения и вызываемые ими деформации могут возникать при воздействии на тело внешних сил растяжения, сжатия и т.д., а также в результате фазовых (структурных) превращений, усадки и других протекающих в металле физико-химических процессов, связанных с изменением объема.

Деформация под действием напряжения может быть упругой и пластической (остаточной). Пластическая деформация происходит только под действием касательных напряжений, достаточных для необратимого перемещения атомов в кристаллической решетке.

Упругой называется деформация, полностью исчезающая после прекращения действия (снятия) вызвавших ее напряжений.

При упругой деформации происходит незначительное изменение расстояний между атомами в кристаллической решетке. С увеличением межатомных расстояний существенно возрастают силы взаимного притяжения атомов. При снятии напряжения под действием этих сил атомы возвращаются в исходное положение.

Если нормальные напряжения достигнут значения сил межатомной связи, то произойдет хрупкое разрушение путем отрыва одной части объекта от другой. Упругую деформацию вызывают также и небольшие касательные напряжения.

Пластической или *остаточной* называется деформация, остающаяся после прекращения действия вызвавших ее напряжений. При пластической деформации в кристаллической решетке металла под действием касательных напряжений происходит необратимое перемещение атомов. При небольших напряжениях атомы смещаются незначительно и после снятия напряжений возвращаются в исходное положение. При увеличении касательного напряжения наблюдается необратимое смещение атомов, то есть происходит пластическая деформация, причем сплошность тела не нарушается. В результате развития пластической деформации может произойти пластическое (вязкое) разрушение путем сдвига.

В кристаллической решетке сдвиг (скольжение) происходит по плоскостям и в направлениях с наиболее плотной упаковкой атомов. Эти плоскости, называемые *плоскостями сдвига* или *скольжения*, зависят от типа кристаллической решетки. Чем больше элементов сдвига в решетке, тем выше пластичность.

Деформация двойникованием представляет собой перестройку части кристалла в новое положение, зеркально симметричное по отношению к недеформированной части кристалла (рис. 5.1). Плоскость, по отношению к которой выполняется зеркальная симметрия, называется *плоскостью двойникования*. При двойниковании атомные плоскости сдвигаются параллельно плоскости двойникования на разные расстояния. По сравнению со скольжением двойникование занимает второстепенное положение, деформация за счет двойникования всегда меньше деформации скольжения. Роль двойникования возрастает, если скольжение невозможно или сильно за-

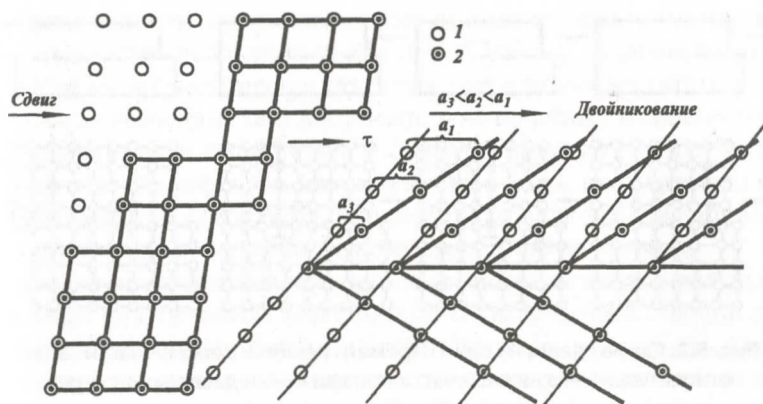


Рис. 5.1. Перемещение атомов при сдвиге (слева) и двойниковании (справа).
Положение атомов до (1) и после (2) деформации

труднено. В металлах с ОЦК- и ГЦК-решетками двойникование наблюдается лишь при низких температурах и высоких скоростях деформации. В металлах с ГПУ-решеткой, где немного систем скольжения, деформирование при нормальных условиях сопровождается двойникованием.

Дислокационный механизм пластической деформации. Атомы, расположенные в поле дислокации, возбуждены, их энергия повышена, они уже выведены из регулярных положений с минимальной свободной энергией. Такое состояние кристалла нестабильно. Достаточно приложить существенно меньшие напряжения, чем при синхронном сдвиге, чтобы ограниченная группа атомов, слегка сместившись, заняла новые устойчивые положения. Так совершается элементарный акт пластической деформации с затратой минимума энергии (рис. 5.2).

Рассмотренная схема пластической деформации позволяет сделать вывод, что процесс сдвига в кристалле будет происходить тем легче, чем больше дислокаций будет в металле. Когда дислокации отсутствуют, сдвиг возможен только за счет одновременного смещения всей части кристалла. Как доказано выше, реальная прочность металлов зависит от плотности дислокации при деформации. Достигнув минимального значения при некоторой плотности дислокации, реальная прочность начинает возрастать.

Техническая (реальная) прочность металлов в 10–1000 раз меньше, чем их теоретическая прочность, определяемая силами межатомного сцепления. Так, для железа теоретически вычисленное зна-

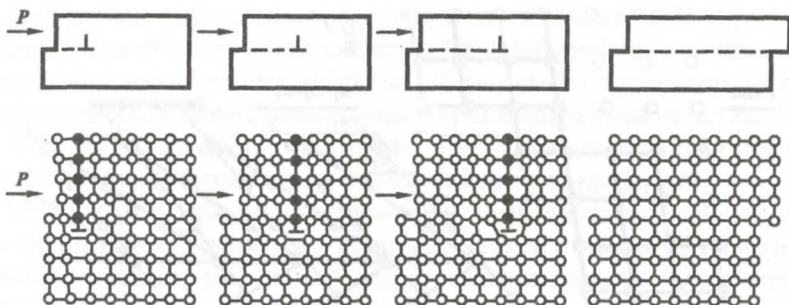


Рис. 5.2. Схема сдвига на один параметр решетки верхней части зерна относительно его нижней части при движении дислокации через всю плоскость скольжения

чение сопротивления отрыву $S_{от} = 21 \cdot 10^3$ МПа. Техническая же прочность $S_{от} = 700$ МПа.

Такое большое различие объясняется тем, что теоретическая прочность соответствует идеальной бездефектной структуре металла. В реальных металлах всегда имеются дислокации и другие дефекты кристаллической решетки, включения, микротрещины, понижающие прочность и инициирующие разрушение (рис. 5.3).



Рис. 5.3. Зависимость прочности от количества дислокаций и других дефектов кристаллической решетки (схема И.А. Одингга):

1 — чистые отожженные металлы; 2 — сплавы, упрочненные легированием, термической обработкой, пластической деформацией (наклеп) и т.п.

Минимальную прочность имеют чистые отожженные металлы при плотности дислокаций около 10^7 – 10^8 см⁻². С уменьшением количества дислокаций прочность возрастает и может достигать теоретического значения. Так, например, у нитевидных металлических кристаллов-«усов» толщиной 0,5–2 мкм и длиной до 10 мм структура практически бездефектна. Они имеют прочность, почти равную теоретической: $\sigma_{\text{в}} = 13\,500$ МПа. Увеличение размеров «усов» приводит к появлению дислокаций и резкому снижению прочности.

Наклепом называется изменение свойства металла в результате холодной пластической деформации. С увеличением степени пластической деформации повышаются прочность и твердость. Одновременно понижаются пластичность и вязкость металла, то есть происходит его охрупчивание. Наиболее высокопрочным материалом в современной технике является нагартованная стальная проволока, получаемая в результате холодного волочения при степени деформации 80–90% и имеющая временное сопротивление 3000–4000 МПа. Такая прочность не может быть достигнута легированием и термообработкой. В результате наклепа существенно изменяются физические и химические свойства металлов (например, повышаются электросопротивление, растворимость в кислотах, уменьшается теплопроводность).

Упрочнение при наклепе объясняется прежде всего тем, что с увеличением степени пластической деформации на несколько порядков возрастает число дислокаций. Особо эффективными «барьерами» для дислокаций являются границы зерен и блоков. Дислокации могут тормозиться дисперсионными частицами, выделяющимися из твердого раствора при деформировании.

Сверхпластичность. В общем случае способность металла к значительной равномерной деформации без упрочнения называется *сверхпластичностью*.

Состояние сверхпластичности может быть достигнуто в специальных сплавах при соответствующей термообработке и особых условиях деформирования.

5.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ

Прочность — способность тела (металла) сопротивляться деформациям и разрушениям. Большинство технических характеристик прочности определяют в результате статического испытания на растяжение.

На рис. 5.4 приведена диаграмма растяжения отожженной стали. При нагрузке, соответствующей начальной части диаграммы, мате-

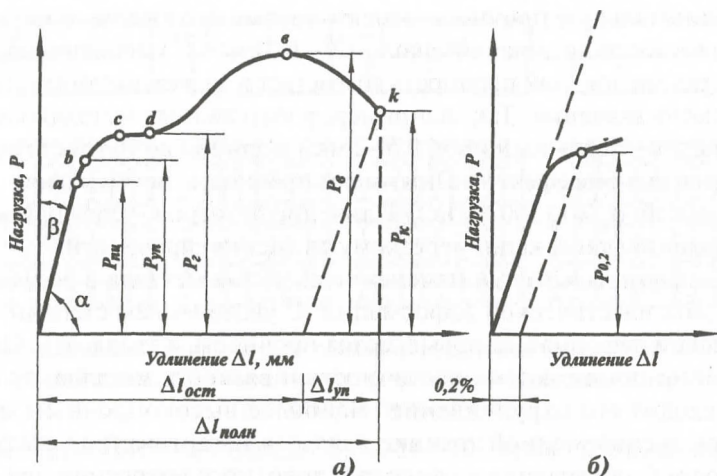


Рис. 5.4. Диаграмма растяжения низкоуглеродистой стали (а) и схема определения условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ (б)

риал испытывает только упругую деформацию. Точке *a*, определяющей конец прямолинейного участка диаграммы растяжения, соответствует предел пропорциональности.

Теоретический предел пропорциональности — максимальное напряжение, до которого сохраняется линейная зависимость между напряжением и деформацией. Прямолинейную зависимость между напряжением и деформацией выражают законом Гука:

$$\sigma = E \cdot \epsilon,$$

где $\epsilon = \Delta l / l_0 \cdot 100$ — относительная деформация, %; Δl — абсолютное удлинение; l_0 — начальная длина отрезка. Коэффициент пропорциональности $E(\text{tg } \alpha)$, характеризующий упругие свойства материала, называется *модулем нормальной упругости*. При заданном напряжении с увеличением модуля уменьшается значение упругой деформации, то есть возрастает жесткость (устойчивость) конструкции. Поэтому модуль E также называют *модулем жесткости*. Значение модуля зависит от природы сплава и меняется незначительно при изменении его состава, структуры, термообработки.

Теоретический предел упругости — максимальное напряжение, до которого образец получает только упругую деформацию $a_{\text{уп}}$.

Из-за трудности определения истинных напряжений пользуются условными стандартными характеристиками прочности. Дело в том, что при определении условных напряжений площадь сечения образца считается неизменной, но на самом деле при растяжении

она все время уменьшается. Истинное напряжение получается при делении нагрузки на площадь, которую образец имел в тот же момент. Истинные напряжения больше условных во всей области пластического деформирования.

В повседневной практике пользуются условными напряжениями, которые достаточно точно характеризуют прочность и определяются проще, чем истинные. Условный предел упругости определяет напряжение, при котором пластическая деформация достигает некоторой малой величины. Часто используют величины остаточной деформации 0,005; 0,01; 0,03 и 0,05%. В обозначении условного предела упругости указывают значение остаточной деформации $\sigma_{0,005}$; $\sigma_{0,01}$ и т.д.

Предел упругости — важная характеристика пружинных материалов, которые используются для упругих элементов приборов и машин.

Предел текучести — физический и условный — характеризует сопротивление материала небольшим пластическим деформациям.

Физический (истинный) предел текучести — напряжение, при котором происходит увеличение деформации при постоянной нагрузке:

$$\sigma_T = \frac{P_T}{F_0}.$$

На диаграмме растяжения (см. рис. 5.4) пределу текучести соответствует горизонтальный участок ($c-d$), когда наблюдается пластическая деформация (удлинение) — «течение» металла при постоянной нагрузке.

Условный предел текучести — напряжение, вызывающее остаточную деформацию, равную 0,2% от начальной расчетной длины образца: $\sigma_{0,2}$.

При дальнейшем нагружении пластическая деформация все больше увеличивается, равномерно распределяясь по всему объему образца. В точке e , где нагрузка достигает максимального значения, начинается образование «шейки» — сужение поперечного сечения; деформация сосредоточивается на одном участке — из равномерной переходит в местную. В этот момент испытания напряжение называется временным сопротивлением.

Временное сопротивление разрыву — напряжение, соответствующее максимальной нагрузке, которую выдерживает образец до разрушения: σ_B .

По своей физической сущности σ_T характеризует прочность как сопротивление значительной равномерной пластической дефор-

мации. За точкой *в* (см. рис. 5.4) вследствие развития шейки нагрузка уменьшается, в точке *к* при нагрузке P_k происходит разрушение образца.

Истинное сопротивление разрушению — максимальное напряжение, которое выдерживает материал в момент, предшествующий разрушению образца: $S_k = P_k/F_k$, где F_k — конечная площадь поперечного сечения образца в месте разрушения.

Истинные напряжения. Рассмотренные показатели прочности: σ_T , σ_B и другие, за исключением S_k , являются условными напряжениями, так как при их определении соответствующие нагрузки относят к начальной площади сечения образца F_0 , хотя последняя постепенно уменьшается по мере деформации образца. Более точное представление о напряжениях в образце дают диаграммы истинных напряжений (рис. 5.5). Истинные напряжения $S_i = P_i/F_i$ определяют по нагрузке P_i и площади поперечного сечения F_i в данный момент испытания. Примерно до точки *б* различие между истинными и условными напряжениями невелико и $S_B \approx \sigma_B$. Затем истинные напряжения увеличиваются, достигая максимального значения S_k в момент, предшествующий разрушению.

Пластичность — способность тела (металла) к пластической деформации, то есть способность получать остаточные изменения формы и размеров без нарушения сплошности. Это свойство используют при обработке металлов давлением. Характеристиками плас-

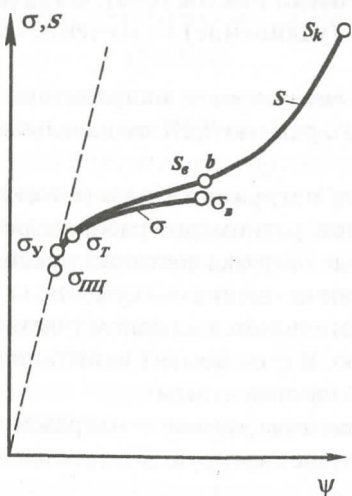


Рис. 5.5. Диаграмма истинных (S) и условных (σ) напряжений:
 ψ — поперечное сужение образца

тичности являются относительное удлинение и относительное сужение.

Относительное удлинение, %:

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100 = \frac{\Delta l_{\text{ост}}}{l_0} \cdot 100,$$

где l_k, l_0 — соответственно конечная и начальная длина образца; $\Delta l_{\text{ост}}$ — удлинение образца.

Относительное удлинение, определяемое на длинных образцах, обозначается δ_{10} , на коротких — δ_5 , причем всегда

$$\delta_5 < \delta_{10}.$$

Относительное сужение, %:

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100,$$

где F_0 — начальная площадь поперечного сечения образца; F_k — конечная площадь в шейке после разрыва.

У пластичных материалов относительное сужение более точно характеризует их максимальную пластичность — способность к местной деформации — и нередко служит технологической характеристикой при листовой штамповке.

5.3. ТВЕРДОСТЬ

Твердостью металла называют его свойство оказывать сопротивление пластической деформации при контактном воздействии (внедрении) стандартного тела-наконечника (индентора) на поверхностные слои материала. Измерение твердости вследствие быстроты и простоты осуществления получило широкое применение для контроля качества изделий. Испытание на твердость — основной метод оценки качества термообработки изделия.

Определение твердости по методу Бринелля. Метод основан на том, что в плоскую поверхность под нагрузкой P внедряют стальной шарик диаметром D (рис. 5.6, а). Число твердости НВ определяется отношением нагрузки P к сферической поверхности отпечатка — лунки (шарового сегмента) E диаметром d .

Диаметр шарика выбирают в зависимости от толщины изделия: $D = 10; 5; 2,5$ мм.

Метод Роквелла (обобщенно обозначается символом НR) основан на статическом вдавливании в испытываемую поверхность наконечника под определенной нагрузкой (рис. 5.6, б). В качестве наконеч-

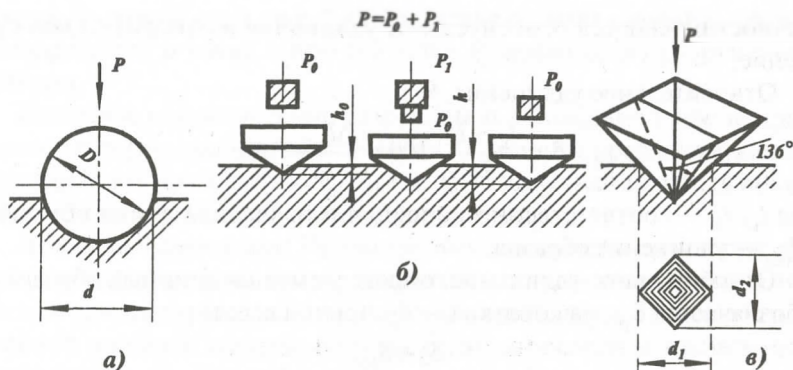


Рис. 5.6. Схемы определения твердости по Бринеллю (а), по Роквеллу (б), по Виккерсу (в)

ников для материалов с твердостью до 450 HR используют стальной шарик. В этом случае твердость обозначают как HRB. В зависимости от нагрузки на наконечник при использовании алмазного конуса твердость обозначают как HRA и HRC.

Твердость по методу Виккерса определяют путем статического вдавливания в испытуемую поверхность алмазной четырехгранной пирамиды с углом $\alpha = 136^\circ$ между противоположными гранями (рис. 5.6, в). Число твердости определяют по формуле

$$HV = \frac{P}{F} - \frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 1,854 \frac{P}{d^2},$$

где d — диагональ отпечатка; $P = 5-100$ кгс.

При испытании измеряют обе диагонали (d_1 и d_2) отпечатка с точностью до 0,001 мм при помощи микроскопа, который является составной частью прибора Виккерса. Числа твердости определяют как среднеарифметическое значение $(d_1 + d_2)/2$ обеих диагоналей.

Метод микротвердости предназначен для определения твердости отдельных структурных составляющих и фаз сплавов (например, зерен феррита в сталях), очень тонких поверхностных слоев (сотые доли миллиметра). По существу метод микротвердости не отличается от метода Виккерса. Различие состоит лишь в том, что наконечник — четырехгранная пирамида — имеет меньшие размеры и нагрузки при вдавливании такой пирамиды составляют от 5 до 500 гс.

5.4. РАЗРУШЕНИЕ МЕТАЛЛОВ

Под *разрушением* понимают процесс зарождения и развития в металле трещин, приводящий к разделению его на части. Разрушение происходит в результате или развития нескольких трещин, или слияния рядом расположенных трещин в одну магистральную трещину, по которой происходит полное разрушение.

Обычно сопротивление деформации объединяют в общее понятие *прочность*, а сопротивление разрушению — *надежность*. Если разрушение происходит не за один, а за многие акты нагружения, причем за каждый акт происходит микроразрушение, то это характеризует *долговечность* материала. Очевидно, что высококачественный конструкционный материал должен быть одновременно прочным, надежным и долговечным.

Разрушение может быть *хрупким* и *вязким*. Механизм зарождения трещин одинаков как при хрупком, так и при вязком разрушении. Возникновение микротрещин чаще происходит благодаря скоплению движущихся дислокаций перед препятствием, например перед границами блоков и зерен, перед слиянием дислокаций и т.д. При большой плотности дислокаций происходит их слияние с образованием микротрещины. Трещина образуется в плоскости, перпендикулярной плоскости скольжения, когда плотность дислокаций достигает $10^{10} - 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Возможны и «безбарьерные» механизмы образования трещин, например в результате взаимодействия дислокаций в кристаллической решетке (рис. 5.7, б).

Хрупкое разрушение происходит путем отрыва под действием нормальных растягивающих напряжений, когда они достигают предельного значения сопротивления отрыву. До разрушения материал испытывает упругую деформацию, иногда — небольшую пластическую деформацию. Характеристикой хрупкого разрушения является сопротивление отрыву. Для хрупкого разрушения характерным является кристаллический излом, обычно по границам зерен, плоскость разрушения перпендикулярна к нормальным растягивающим напряжениям. Хрупкое разрушение имеет «ручьеистое» строение поверхности излома.

Скорость распространения хрупкой трещины велика — близка к скорости звука. Поэтому хрупкое разрушение называют *внезапным* или *катастрофическим* разрушением.

В реальных материалах обычно происходит не абсолютно хрупкое разрушение, а микропластическое. Когда материал находится в упругодеформированном состоянии, у вершины трещины из-за концентрации напряжений возникает пластическая микродеформация.

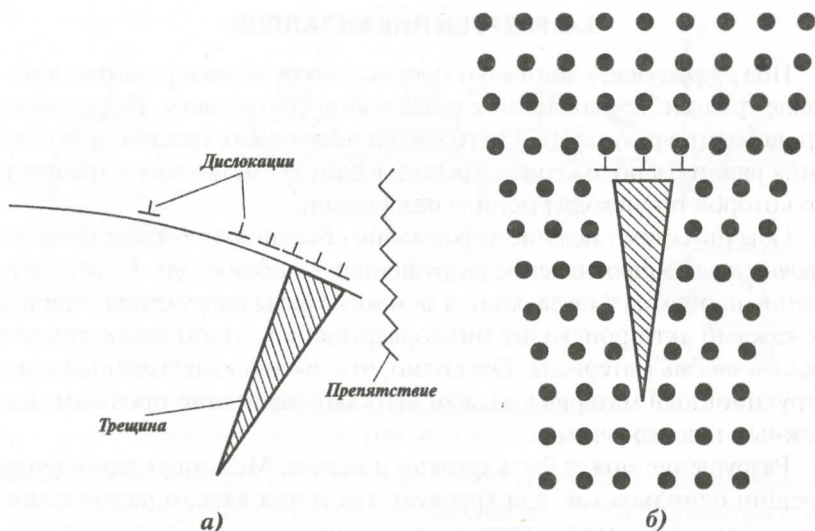


Рис. 5.7. Скопление дислокаций у препятствий (а), слияние дислокаций и образование зародышевой трещины (б)

Вязкое (пластическое) разрушение происходит путем среза под действием касательных напряжений и обусловлено малой скоростью распространения трещины. Ему соответствует большая работа распространения трещины. Разрушение происходит после предварительной значительной пластической деформации с поглощением энергии внешнего нагружения за счет вязкости металла. Для вязкого разрушения характерным является волокнистый излом, что связано с пластическим деформированием металла. Плоскость излома расположена под углом. Наблюдается «чашечное» микростроение излома. По виду микроструктуры различают разрушение транскристаллитное и интеркристаллитное. При транскристаллитном разрушении трещина распространяется по телу зерна, а при интеркристаллитном она проходит через тело зерна.

5.5. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ПЛАСТИЧНОЕ И ХРУПКОЕ СОСТОЯНИЕ

Вязкость — способность материала поглощать механическую энергию внешних сил за счет пластической деформации. По физическому смыслу вязкость — энергетическая характеристика и выражается в единицах работы, например в Дж.

Вязкость металлов и сплавов определяется их химическим составом, термической обработкой и другими внутренними факторами. Наряду с этим вязкость зависит от условий, в которых находится металл при работе в изделии. При определенных условиях один и тот же металл будет находиться в пластичном (вязком) состоянии, при других он перейдет в хрупкое состояние. Такими условиями являются температура, скорость нагружения, наличие концентраторов напряжения, вид напряженного состояния, масштабный фактор.

Влияние температуры. Предел текучести σ_T существенно изменяется с температурой, тогда как на $S_{от}$ (сопротивление отрыву) температура практически не влияет. При температуре T_v (верхний порог хрупкости, или ломкости) $\sigma_T < S_{от}$, при нагружении сначала произойдет пластическое деформирование, а затем разрушение. Следовательно, металл будет находиться в вязком состоянии. При температурах T_n (нижний порог хрупкости, или хладноломкости) $S_{от} < \sigma_T$ металл будет разрушаться без предварительной пластической деформации, то есть будет находиться в хрупком состоянии.

Хладноломкостью называют склонность металла к переходу в хрупкое состояние при понижении температуры.

Хладноломкими являются железо, вольфрам, цинк и другие металлы, имеющие ОЦК- и ГПУ-решетки. Металлы и сплавы с ГЦК-решеткой не склонны к хладноломкости; такие металлы можно использовать в криогенной технике.

Влияние скорости деформации проявляется в том, что при переходе от статического к динамическому нагружению предел текучести увеличивается, то есть $S_{тдин} > S_T$, тогда как сопротивление отрыву $S_{от}$ от скорости деформации практически не зависит. С увеличением скорости деформации интервал хрупкости сдвигается в область более высоких температур. Металл, находящийся при статическом нагружении в вязком состоянии, при динамическом нагружении может перейти в хрупкое состояние.

Влияние концентраторов напряжений (надреза) как фактора охрупчивания очень значительно. Концентраторами напряжения могут быть отверстия, выточки, канавки, включения и т.д. Особую опасность как очаги хрупких разрушений представляют трещины. Влияние надрезов проявляется прежде всего в том, что у вершины надреза создается концентрация напряжений. Чем острее и глубже надрез, тем больше влияние коэффициента концентрации напряжений.

У пластичных материалов около вершины надреза при $\sigma_{max} \geq S_{от}$ начинается местная пластическая деформация; при этом металл

упрочняется, уменьшаются острота надреза и концентрация напряжения, что может обеспечить надежную работу изделия. У материалов, не способных к местной пластической деформации, при $\sigma_{\max} \geq S_{\max}$ у вершины надреза может образоваться трещина; при ее развитии и создается хрупкое разрушение.

Влияние вида напряженного состояния. Различные способы нагружения характеризуются коэффициентом мягкости:

$$\alpha = \tau_{\max} / S_{\max},$$

где τ_{\max} — наибольшие касательные напряжения; S_{\max} — наибольшие растягивающие напряжения. Для осевого сжатия $\alpha = 2$; для кручения — 0,8; для осевого растяжения — 0,5. Для одного и того же материала при сжатии происходит вязкое разрушение путем среза с предварительной пластической деформацией. При растяжении происходит хрупкое разрушение путем отрыва.

Влияние размеров изделия (масштабный фактор) заключается в том, что с увеличением массы возрастает вероятность наличия в объеме металла дефектов, инициирующих процесс разрушения.

5.6. УДАРНАЯ ВЯЗКОСТЬ

Для оценки вязкости материалов, установления их склонности к переходу из вязкого в хрупкое состояние наиболее часто проводят испытания надрезанных образцов на маятниковых копрах. Для получения сопоставимых результатов испытания проводят на стандартных образцах нескольких типов с надрезами определенной формы и размеров. На разрушение образца затрачивается работа

$$A = P(H - h),$$

где P — масса маятника, кг; H, h — соответственно высота подъема маятника до и после удара, м.

Характеристикой вязкости является ударно-надрезная вязкость, называемая просто *ударной вязкостью*:

$$a_n = \frac{A}{F_0}, \frac{\text{м} \cdot \text{Дж}}{\text{м}^2},$$

где F_0 — площадь сечения образца в месте надреза.

Ударную вязкость обозначают буквенными сочетаниями: КСУ, КСВ, КСТ. Буквы КС означают символ ударной вязкости, третья буква — соответственно U, V, T — вид концентратора напряжений.

Для оценки сплошности и хладноломкости металла и определения критических порогов хладноломкости (хрупкости) испыты-

вают серию образцов при различных температурах, определяя верхний T_v и нижний T_n пороги хладноломкости.

Порог хладноломкости является одним из важнейших параметров конструкционной прочности материалов. Он является качественной характеристикой, прогнозирующей поведение материала в процессе эксплуатации. Чем ниже порог хладноломкости, тем менее чувствителен металл к концентраторам напряжений (резкие переходы в сечении, отверстия, риски, царапины и т.д.), к скорости деформации.

Ударная вязкость a_n является характеристикой, чувствительной к структурному состоянию, содержанию вредных примесей.

Вместе с тем ударная вязкость a_n не позволяет достаточно надежно установить сопротивление металла хрупкому разрушению и является качественной характеристикой вязкого разрушения. Изделия могут разрушаться хрупко и при достаточно высоком значении a_n .

Оценка вязкости по виду излома основана на том, что для хрупкого разрушения характерным является кристаллический, а для вязкого — волокнистый излом.

5.7. УСТАЛОСТЬ МЕТАЛЛОВ

Усталостью называется разрушение металлов под действием повторных или знакопеременных нагрузок. Усталостное разрушение происходит, например, у пружины автоматики, деталей кулачковых и других механизмов, работающих в режиме «нагружение — разгружение», «растяжение — сжатие», при многократном повторении ударных и плавно возрастающих нагрузок; у валов, передающих крутящий момент, материал которых испытывает изгиб с вращением, происходит многократное изменение знака напряжений («растяжение — сжатие») и т.д.

Усталостное разрушение имеет ряд характерных признаков. Оно происходит внезапно, без заметных внешних признаков пластической деформации. Как правило, в усталостном изломе наблюдаются две характерные зоны. Первая зона, имеющая гладкую поверхность, образуется в результате возникновения и постепенного развития усталостной трещины, вторая зона — зона окончательного излома оставшейся части сечения изделия.

Характерно и то, что усталостное разрушение развивается в деталях, работающих при напряжении меньше напряжения предела текучести металла. Образование усталостной трещины связано с реальным строением металлов — наличием различно ориентированных

зерен и блоков, неметаллических включений, микропор, дислокаций и твердых дефектов кристаллической решетки.

Таким образом, усталость — процесс постепенного накопления повреждений металла под действием повторно-переменных напряжений, приводящих к образованию трещин и разрушению.

Свойство металла сопротивляться усталости называется *выносливостью*.

Предел выносливости (теоретический) — наибольшее напряжение цикла, которое выдерживает материал без разрушений при бесконечно большом числе циклов нагружения.

Обычно предел выносливости определяют на базе заданного числа циклов нагружения N . Для стали $N = 10^7$, для цветных металлов $N = 10^8$ циклов нагружения. Наиболее часто предел выносливости определяют при испытании образца на изгиб с вращением со знакопеременным симметричным циклом напряжений.

Предел выносливости существенно зависит от качества обработки поверхности. Так, по сравнению с полированной поверхностью предел выносливости σ_{-1} образца снижается при обработке его грубым напильником на 20%. При коррозионном воздействии σ_{-1} может понижаться в несколько раз.

5.8. ВЛИЯНИЕ НАГРЕВА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННЫХ МЕТАЛЛОВ

Почти 95% энергии, затрачиваемой на деформацию металла, превращается в тепловую, остальная часть энергии поглощается металлом, аккумулируется в нем в виде повышенной потенциальной энергии смещенных атомов, напряжений, в виде повышенной плотности несовершенств структуры (вакансий, дислокаций). О накоплении энергии свидетельствует также рост остаточных напряжений в результате деформации. В связи с этим состояние деформированного (наклепанного) металла термодинамически неустойчиво. Такая неравновесная структура у большинства металлов устойчива при комнатной температуре. Переход к более устойчивому состоянию связан с уменьшением искажений в кристаллической решетке, снятием напряжений, что определяется возможностью перемещения атомов. При повышении температуры увеличивается диффузия атомов, в связи с чем ускоряется перемещение точечных дефектов и создаются условия для перераспределения дислокаций и уменьшения их количества. Так начинают развиваться процессы, приводящие металл к более равновесному состоянию.

Процессы, происходящие при нагреве, подразделяют на две основные стадии: возврат и рекристаллизацию; обе стадии сопровождаются выделением теплоты и уменьшением свободной энергии. Возврат происходит при относительно низких температурах, рекристаллизация — при более высоких.

Возвратом называют все изменения тонкой структуры и свойств, которые не сопровождаются изменением микроструктуры деформированного металла, то есть размер и форма кристаллов при возврате не изменяются. Стадию возврата, в свою очередь, разделяют на две стадии: отдых и полигонизацию.

Отдых происходит при невысоком нагреве. При этом наблюдается уменьшение количества вакансий и плотности дислокаций, частичное снятие остаточных напряжений. Отдых вызывает значительное уменьшение электросопротивления и повышение плотности металлов. С уменьшением плотности дислокаций уменьшаются твердость и прочность металла (алюминий, железо). Если плотность дислокаций при отдыхе не меняется, то он не сопровождается изменением механических свойств (медь, латунь, никель).

Вторая стадия возврата — **полигонизация**: деление зерен на части — полигоны (субзерна) размером 10^{-6} – 10^{-4} см. В пределах каждого кристалла образуются малоугловые границы. Границы возникают путем скольжения и переползания дислокаций; в результате кристалл разделяется на субзерна — полигоны, свободные от дислокаций, а дислокации скапливаются на границах полигонов, образуя стенки. Два полигона, разделенные стенкой (малоугловой границей), состоящей из нескольких краевых дислокаций, схематично показаны на рис. 5.8.

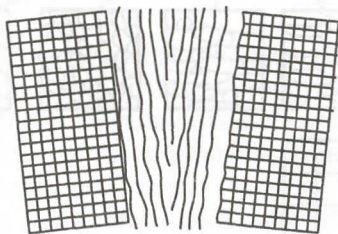


Рис. 5.8. Схема расположения двух полигонов

Полигонизация в металлах технической чистоты и в сплавах — твердых растворах — наблюдается только после небольших степеней деформаций и не у всех металлов. Так, этот процесс редко развивается в меди и ее сплавах, хорошо выражен в алюминии, железе, молибдене и их сплавах.

Полигонизация — энергетически выгодный процесс, приводит к уменьшению твердости и характеристик прочности металлов и сплавов.

Температура начала полигонизации не является постоянной. Скорость полигонизации зависит от природы металла, от степени предыдущей деформации, содержания примесей и т.д.

При возврате заметных изменений в микроструктуре не наблюдается, металл сохраняет волокнистое строение. При этом твердость и прочность несколько понижаются, а пластичность возрастает (рис. 5.9).

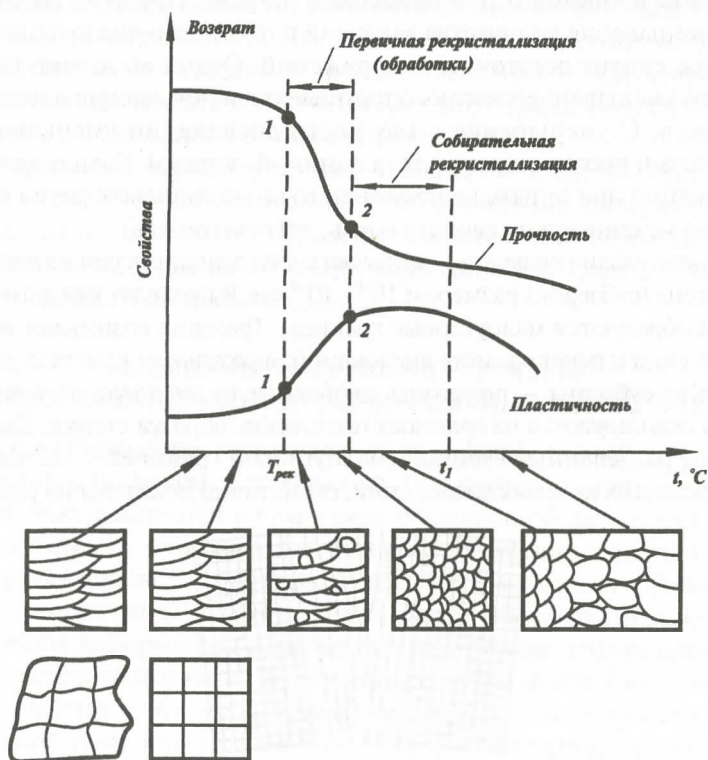


Рис. 5.9. Схема изменения структуры и свойств наклепанного металла при возврате (отдыхе) и рекристаллизации

Рекристаллизация. При нагреве до довольно высоких температур подвижность атомов возрастает и происходит процесс рекристаллизации. Рекристаллизацией называют процесс образования и роста новых зерен при нагреве деформированного металла до опреде-

ленной температуры (рис. 5.9). Процесс рекристаллизации пластически деформированного металла может происходить лишь после деформации, степень которой превышает определенную минимальную величину, называемую критической степенью деформации. Если степень деформации ниже критической, то зарождения новых зерен при нагреве не происходит. Критическая степень деформации невелика (2–8%); для алюминия — 2%, для железа и меди — 5%.

Существует также *температурный порог рекристаллизации* — это наименьшая температура нагрева, обеспечивающая возможность зарождения новых зерен. Температурный порог рекристаллизации составляет некоторую долю от температуры плавления металла:

$$T = kT_{\text{пл}},$$

Значение коэффициента k зависит от чистоты металла и степени пластической деформации. Для металлов технической чистоты $k = 0,3–0,4$ и понижается с увеличением степени деформации. Для алюминия, меди и железа технической чистоты температурный порог рекристаллизации равен соответственно 100; 270; 450 °С.

Различают рекристаллизацию первичную и собирательную.

Первичная рекристаллизация заключается в образовании зародышей и росте новых равновесных зерен с неискаженной кристаллической решеткой. Наиболее вероятно, что новые зерна возникают у границ блоков и зерен, внутри зерен, где решетка металла наиболее сильно искажена при пластической деформации. Чем больше степень пластической деформации, тем больше возникает центров рекристаллизации. Количество новых зерен постепенно увеличивается, и в конечном счете в структуре не остается старых деформированных зерен.

Движущей силой первичной рекристаллизации является энергия, аккумулированная в деформированном металле.

Первичная рекристаллизация заканчивается при полном поглощении новыми зернами старых деформированных зерен.

Собирательная рекристаллизация заключается в росте образовавшихся новых зерен. Движущей силой собирательной рекристаллизации является поверхностная энергия зерен. Укрупнение зерен приводит к уменьшению свободной энергии металла из-за уменьшения поверхностной энергии (чем крупнее кристаллы, тем меньше суммарная поверхность). Рост зерен происходит путем перехода атомов от одного зерна к соседнему через границу раздела; одни зерна при этом постепенно уменьшаются в размерах, затем исчезают, а другие растут, поглощая соседние зерна. Чем выше тем-

пература нагрева, тем более крупными окажутся рекристаллизованные зерна. Температура рекристаллизации имеет важное практическое значение. Чтобы восстановить структуру и свойства наклепанного металла, его надо нагреть выше температуры рекристаллизации. Такая обработка называется *рекристаллизационным отжигом*.

Металл после этого полностью освобождается от наклепа, приобретает равновесную структуру с минимальным количеством дефектов кристаллического строения. Восстанавливаются все физические и механические свойства.

Пластичность и вязкость металлов и сплавов существенно зависят от размера зерен: с их уменьшением эти характеристики свойств уменьшаются. Размер зерен, образующихся в результате рекристаллизации, зависит в основном от степени пластической деформации и от температуры рекристаллизации. С увеличением степени деформации выше критической размер зерна увеличивается вследствие увеличения числа центров рекристаллизации, а повышение температуры нагрева укрупняет зерна из-за ускорения собирательной рекристаллизации.

В рекристаллизованном металле при известных условиях возникает предпочтительная ориентировка зерен — текстура. Текстура рекристаллизации, так же как и текстура другого происхождения, вызывает значительную анизотропию физических и механических свойств. Характер текстуры рекристаллизации определяется условиями проведения отжига, видом предшествующей обработки давлением (прокатка, волочение и др.), а также количеством и природой примесей.

В зависимости от соотношения температуры деформации и температуры рекристаллизации различают холодную и горячую деформацию.

Холодной называют деформацию, которую проводят при температурах ниже температуры рекристаллизации. Поэтому холодная деформация сопровождается упрочнением (наклепом металла).

Деформацию называют *горячей*, если ее проводят при температуре выше температуры рекристаллизации для получения полностью рекристаллизованной структуры.

Горячую деформацию в зависимости от состава сплава и скорости деформации обычно проводят при температурах $(0,7-0,75) T_{пл}$.

Если металл после деформации имеет частично рекристаллизованную структуру, то такую обработку правильнее называть *неполной горячей* или *теплой деформацией*.

Если после деформации при температурах выше температуры рекристаллизации металл (сплав) все же находится в наклепанном состоянии или имеет полигонизованную структуру, то такую обработку следует отнести к холодной.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем различаются между собой вязкое и хрупкое разрушение? Какие факторы способствуют тому или другому виду разрушения?
2. Каким образом можно оценить вязкость металла?
3. В каких случаях может проявляться усталостное разрушение металлов?
4. В чем заключается природа износа металлов и каковы его разновидности?
5. Что такое первичная и собирательная рекристаллизация?
6. Какая деформация называется холодной, а какая — горячей?

Раздел III

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СПЛАВОВ

Глава 6

ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫЕ СПЛАВЫ

6.1. КОМПОНЕНТЫ И ФАЗЫ В СПЛАВАХ ЖЕЛЕЗА С УГЛЕРОДОМ

Железо и углерод — элементы полиморфные.

Железо принадлежит к VIII группе периодической системы. Оно имеет атомный номер 26, атомный вес 55,85. Чистое железо серебристо-белого цвета. Это вязкий и ковкий металл. Он мягок и хорошо прокатывается. Плавится железо при 1539 °С, а кипит при температуре около 3200 °С.

Свойства железа зависят от степени его чистоты. Для технически чистого железа температура плавления равна 1539 °С, плотность составляет 7,85 г/см³. Железо обладает невысокой твердостью и прочностью ($HB = 80$; $\sigma_b = 250$ МПа; $\sigma_{0,2} = 120$ МПа) и хорошей пластичностью: $\delta = 50\%$; $\psi = 80\%$.

При нагреве железо испытывает аллотропическое превращение. До 911 °С железо имеет ОЦК-решетку (К8) с периодом при комнатной температуре $a = 0,286$ нм (Fe_α). При 911 °С происходит превращение ОЦК-решетки в ГЦК-решетку (К12); в температурном интервале 911–1392 °С железо обозначают Fe_γ , $a = 0,356$ нм). При 1392 °С вновь происходит перестройка ГЦК-решетки в ОЦК, которая и сохраняется до температуры плавления. Эту модификацию обозначают Fe_δ . При 768 °С на кривой нагрева железа появляется перегиб, отвечающий изменению его магнитных свойств (точка Кюри железа). До 768 °С Fe_α ферромагнитно, выше этой температуры — парамагнитно. Немагнитную модификацию Fe_α , существующую от 768 до 911 °С, обозначают Fe_β .

Углерод в природе встречается в виде двух модификаций: в форме алмаза, имеющего сложную кубическую решетку, и в форме графита, имеющего простую гексагональную решетку с периодами $a = 0,14$ нм и $c = 0,34$ нм. Для алмаза характерна ковалентная решетка; он не проводит электричества и обладает исключительной твердостью. В графите каждый атом углерода находится в вершине плоского шестиу-

гольника. Его кристалл имеет пластинчатую структуру. Плотность графита — $2,25 \text{ г/см}^3$. В отличие от других материалов временное сопротивление графита увеличивается при повышении температуры: при 20°C $\sigma_{\text{в}} = 20 \text{ МПа}$, при 2500°C временное сопротивление возрастает до 40 МПа , что выше прочности всех тугоплавких металлов при данной температуре. При нагреве до 3650°C начинается сублимация (испарение твердого графита).

Фазы в системе «железо — углерод». Феррит — твердый раствор внедрения углерода в Fe_α , обозначается $\text{Fe}_\delta(\text{C})$. Максимальная растворимость углерода достигает $0,02\%$ при 727°C . При комнатной температуре растворяется меньше $0,006\%$ углерода. Название фазы — феррит — связано с ее ферромагнитными свойствами. Выше 1392°C существует высокотемпературный δ -феррит $\text{Fe}_\delta(\text{C})$ с предельной растворимостью углерода $0,1\%$ при 1499°C . Твердость и механические свойства феррита близки к свойствам технически чистого железа, они зависят от количества элементов, присутствующих в нем. Многие металлы и неметаллы образуют с ферритом твердые растворы замещения. Феррит имеет следующие механические свойства:

$$\sigma_{\text{в}} = 300 \text{ МПа}; \delta = 40\%; \psi = 70\%; \text{HB} = 80\text{--}100.$$

Аустенит — твердый раствор углерода в Fe_γ . Его обозначают $\text{Fe}_\gamma(\text{C})$. Углерод занимает центр ГЦК-ячейки (рис. 6.1). При 1147°C аустенит содержит $2,14\%$ углерода, а при 727°C — всего лишь $0,8\%$. Аустенит парамагнитен, пластичен, имеет низкие значения временного сопротивления и твердости ($\text{HB} = 170\text{--}220$). Элементы, растворяющиеся в нем, могут значительно изменять его свойства, а также температурные границы его существования.

Цементит — химическое соединение железа с углеродом: карбид железа Fe_3C , образующийся при содержании углерода $6,67\%$. Це-

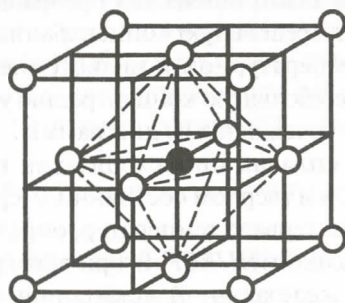


Рис. 6.1. Кристаллическая решетка аустенита:

светлые кружки — атомы железа; черный — атом углерода

ментит имеет сложную решетку, в элементарной ячейке которой находятся 12 атомов железа и 4 атома углерода. Температура плавления цементита — 1550 °С. Он имеет очень высокую твердость ($HV = 800$), хрупкий; до 217 °С обладает слабыми ферромагнитными свойствами. При высоких температурах разлагается на графит и аустенит.

Графит — углерод, выделяющийся в железоуглеродистых сплавах в свободном состоянии. Графит электропроводен, химически стоек, малопрочен, мягок.

Жидкая фаза сплава «железо — углерод» существует выше ликвидуса. Железо хорошо растворяет углерод, образуя жидкую фазу.

Фазы обозначают: Φ — феррит; A — аустенит; Ψ — цементит; $Ж$ — жидкая фаза.

6.2. ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ «ЖЕЛЕЗО — ЦЕМЕНТИТ»

Железо, взаимодействуя с углеродом, образует ряд химических соединений: Fe_3C , Fe_2C , FeC и др. Поскольку устойчивое химическое соединение в диаграммах состояния может быть рассмотрено как компонент, обычно диаграмму «железо — углерод» изображают только до содержания углерода 6,67%, когда образуется химическое соединение карбид железа Fe_3C . Практическое значение имеет только эта часть диаграммы, так как сплавы, содержащие больше углерода, очень хрупкие. Этот участок диаграммы «железо — углерод» называют *диаграммой состояния «железо — цементит»* (рис. 6.2).

Диаграмма состояния $Fe-Fe_3C$ характеризует фазовый состав и превращения в сплавах с концентрацией от чистого железа до цементита.

Точка A определяет температуру плавления чистого железа, а точка D — температуру плавления цементита. Точки N и G соответствуют температурам аллотропических превращений железа. Точки H и P характеризуют предельную концентрацию углерода соответственно в высокотемпературном и низкотемпературном феррите. Точка E определяет наибольшую концентрацию углерода в аустените. Значения остальных точек ясны из диаграммы.

Превращения в сплавах происходят как при затвердевании жидкой фазы $Ж$, так и в твердом состоянии. Первичная кристаллизация происходит в интервале температур, определяемых на линиях ликвидус AB , CD и солидус $AHJRCF$. Вторичная кристаллизация вызвана превращением железа одной аллотропической модификации в другую и переменной растворимостью углерода в аустените и феррите. При понижении температуры эта растворимость уменьшается.

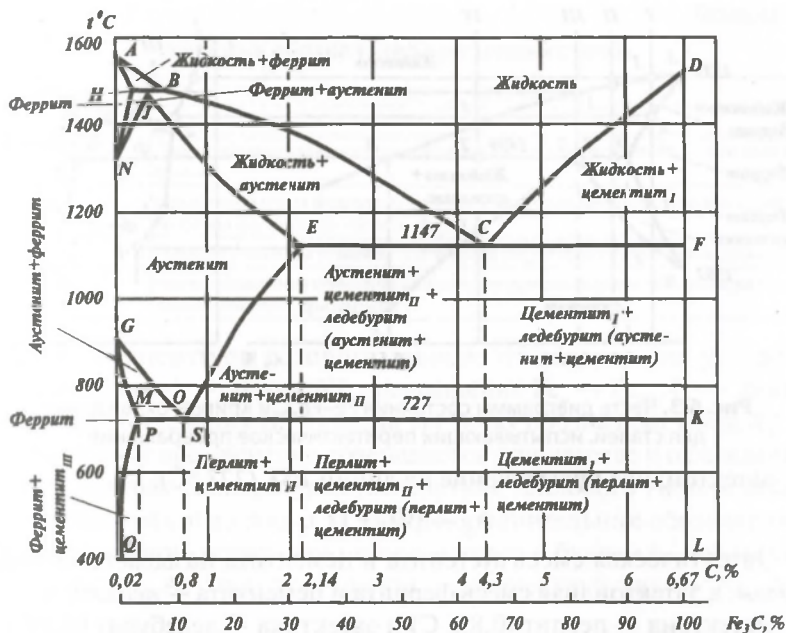


Рис. 6.2. Диаграмма состояния Fe₃C

Избыток углерода из твердых растворов выделяется в виде цементита. Линия *ES* характеризует изменение концентрации углерода в аустените, а линия *PQ* — в феррите. Цементит имеет нормальный химический состав (вертикаль *DFKL*), что отражается на свойствах сплавов.

Наиболее крупные кристаллы цементита образуются, когда он выделяется из жидкости при первичной кристаллизации. Цементит, выделяющийся из жидкости, называют *первичным*; цементит, выделяющийся из аустенита, — *вторичным*, цементит, выделяющийся из феррита, — *третичным*. Соответственно линию *CD* на диаграмме состояния называют линией первичного цементита, линию *ES* — линией вторичного цементита, линию *PQ* — линией третичного цементита.

В системе (Fe–Fe₃C) происходят три изотермических превращения:

- перитектическое превращение на линии *HJB* (1499 °C) (рис. 6.3):



- эвтектическое превращение на линии *ECF* (1147 °C):



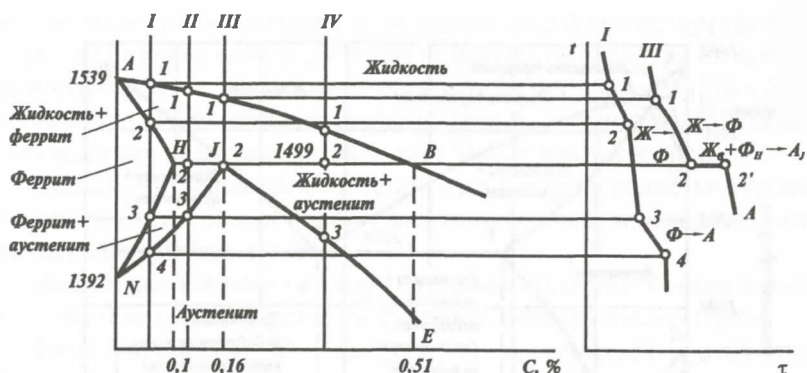


Рис. 6.3. Часть диаграммы состояния Fe–Fe₃C и кривые охлаждения для сталей, испытывающих перитектическое превращение

- эвтектоидное превращение на линии PSK (727 °C):



Эвтектическая смесь аустенита и цементита называется *ледебуритом*, а эвтектоидная смесь феррита и цементита — *перлитом*.

Эвтектоид — перлит (0,8% C) и эвтектика — ледебурит (4,3% C) оказывают важное влияние на свойства сплавов. Перлит имеет пластинчатое строение и является прочной структурной составляющей: $\sigma_B = 800\text{--}900$ МПа; $\sigma_{0,2} = 450$ МПа; $\delta < 16\%$; HB = 180–220. При охлаждении ледебурита ниже линии PSK входящий в него аустенит превращается в перлит (см. рис. 6.2), и при комнатной температуре ледебурит представляет собой уже смесь цементита и феррита. В этой структурной составляющей цементит образует сплошную матрицу, в которой размещены колонии перлита. Такое строение ледебурита служит причиной его большой твердости (HB > 600) и хрупкости. Присутствие ледебурита в структуре сплавов делает их неспособными к обработке давлением, затрудняет обработку резанием.

Сплавы железа с углеродом разделяют на две группы: *стали*, содержащие до 2,14% углерода, и *чугуны*, в которых углерода более 2,14%.

Температуры, при которых происходят фазовые и структурные превращения в сплавах системы (Fe — Fe₃C), называются *критическими точками*, имеющими условные обозначения. Все критические точки обозначают буквой A (табл. 6.1).

Первая критическая точка A₁ лежит на линии PSK (727 °C) и соответствует превращению П → А. Точка A₂ — линия МО (768 °C); при этой температуре происходит магнитное превращение феррита. Точка A₃ — линия GS; по этой линии происходит превращение

Таблица 6.1

Условные обозначения критических точек

Критическая точка	Характер превращения
1	2
A_1	Перлитное (эвтектоидное) превращение (Ac_1 — при нагреве, Ar_1 — при охлаждении)
A_3	Начало выделения феррита из аустенита при охлаждении (Ar_3) или конец растворения феррита при нагреве (Ac_3)
A_4	Переход γ -железа в α -железо при нагреве (Ac_4) и обратно при охлаждении (Ar_4)
Ac_T	Начало выделения цементита из аустенита при охлаждении или конец растворения цементита при нагреве

$\Phi \rightarrow A$, температура которого зависит от содержания углерода в стали. Точка A_4 — линия NJ ; превращение $Fe_\gamma \rightarrow Fe_\delta$; $A_{ст}$ — линия SE ; начало выделения Ц_{11} (иногда эту точку обозначают и как A_3).

Поскольку превращения совершаются при нагреве и охлаждении при различных температурах (вследствие теплового гистерезиса), чтобы отличить эти процессы, ввели дополнительные обозначения. Для обозначения превращений при нагреве к букве «А» добавляют букву «с»: Ac_1 , Ac_2 ; при охлаждении — латинскую букву «г»: Ar_1 , Ar_3 .

6.3. ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА РАВНОВЕСНУЮ СТРУКТУРУ СТАЛЕЙ

В современном машиностроении все большее применение находят стали, в которых помимо железа, углерода и постоянных примесей содержатся специальные добавки других элементов.

Эти добавки, вводимые в сталь в определенных концентрациях с целью изменения ее свойств, называются *легирующими элементами*, а стали соответственно — *легированными сталями*.

В качестве легирующих элементов наиболее часто используются Cr, Mn, Si, Mo, W, V, Ti, Nb, Co. Реже используются Al, Cu, В и некоторые другие элементы.

Почти все легирующие элементы изменяют температуры полиморфных превращений железа, температуру эвтектоидной и эвтектической реакции и влияют на растворимость углерода в аустените. Некоторые легирующие элементы способны, так же как и железо, взаимодействовать с углеродом, образуя карбиды, а также взаимодействовать друг с другом или с железом, образуя промежуточные фазы — интерметаллиды.

В результате изменения температуры фазовых превращений и химического взаимодействия элементов в структуре стали могут появиться новые равновесные фазы.

Влияние легирующих элементов на полиморфизм железа. По влиянию на температуру полиморфных превращений железа легирующие элементы можно разделить на две группы. К *первой группе* относятся элементы, увеличивающие устойчивость аустенита, то есть повышающие точку A_4 и понижающие точку A_3 ; к ним принадлежат Ni, Mn, C, N, Co и др. *Вторая группа*, в которую входит большинство других легирующих элементов (Cr, 1V , 1W , 1Mo , 1Si , 1Ti , 1Nb , 1V и др.), — это элементы, увеличивающие устойчивость феррита, то есть понижающие точку A_4 и повышающие точку A_3 . Исключение составляет Cr, который понижает точки A_3 и A_4 .

Легированный феррит. Легирующие элементы образуют с Fe_α твердые растворы замещения, изменяя период его решетки. Практически все элементы при содержании больше 1% снижают ударную вязкость феррита. Исключение составляет только никель. Искажение кристаллической решетки железа, возрастающее по мере увеличения разницы в атомных размерах, влияет на свойства феррита.

Влияние Cr, Mn, Ni на свойства феррита проявляется более значительно после термообработки, так как они влияют на скорость полиморфного $Fe_\gamma \rightarrow Fe_\alpha$ превращения железа, уменьшая ее (понижают температуру точки A_3). Поэтому при медленном охлаждении безуглеродистого легированного железа ($C < 0,02\%$) образуется обычный феррит, имеющий равноосные зерна. При быстром охлаждении превращение $Fe_\gamma \rightarrow Fe_\alpha$ происходит по мартенситному механизму: безуглеродистый аустенит превращается в безуглеродистый мартенсит с типичным игольчатым строением. При этом имеет место наклеп, растет и плотность дислокаций, измельчается блочная структура. В результате твердость увеличивается до 350 НВ.

Легированный аустенит. В легированных сталях кроме углерода в решетке аустенита находятся также легирующие элементы, образующие с Fe_γ твердые растворы замещения. Свойства такого легированного аустенита существенно отличаются от свойств аустенита углеродистой стали. Легированный аустенит обладает высокой коррозионной стойкостью, химической прочностью при комнатных и высоких температурах, жаропрочностью.

Легированный марганцем ($\approx 13\%$) аустенит хорошо сопротивляется износу трением. Изменяются и другие физико-механические свойства аустенита.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие фазы встречаются в железоуглеродистом сплаве?
2. Как образуется первичный, вторичный и третичный цементит?
3. Что называют сталью и чугуном?
4. Как легирующие элементы влияют на структуру сталей?

Глава 7

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

7.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ, НАЗНАЧЕНИЕ ВИДОВ ТЕРМООБРАБОТКИ

Свойства сплава зависят от его структуры. Основным способом, позволяющим изменять структуру, а следовательно, и свойства, является термическая обработка. *Термической обработкой* называют технологические процессы, включающие нагрев и охлаждение металлических изделий с целью изменения структуры и свойств.

Ей подвергают слитки, отливки, полуфабрикаты после горячей и холодной обработки давлением, сварные соединения, детали машин, инструмент.

Основы термической обработки были разработаны русским ученым Д.К. Черновым. Дальнейшее развитие теория термической обработки получила в работах С.С. Штейнберга, А.А. Бочвара, Т.В. Курдюмова, А.П. Гуляева, Э. Бейна, Э. Давенпорта и других ученых.

7.2. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ТЕРМООБРАБОТКИ СТАЛИ

Основой для изучения термообработки стали является диаграмма состояния.

Поскольку рассматривается термообработка стали, то имеют значение только сплавы с концентрацией до 2,14%.

Верхней границей при термообработке является линия солидуса, поэтому процессы первичной кристаллизации (и следовательно, верхняя часть диаграммы) в данном случае не имеют большого значения.

Необходимый участок диаграммы состояния Fe–Fe₃C изображен на рис. 7.1.

Ниже дана характеристика основных видов термообработки.

Отжиг — фазовая перекристаллизация, заключающаяся в нагреве выше A_{c3} с последующим медленным охлаждением. При нагреве выше A_{c1} , но ниже A_{c3} полная перекристаллизация не произойдет; такая термообработка называется *неполным отжигом*. При отжиге состояние стали приближается к структурно равновесному; структура стали после отжига: перлит + феррит; перлит; перлит + цементит. Если после нагрева выше A_{c3} провести охлаждение на воз-



Рис. 7.1. «Стальной» участок диаграммы состояния Fe–Fe₃C

духе, то это будет первым шагом к отклонению от практически равновесного структурного состояния. Эта термическая операция называется *нормализацией*. Такая обработка (нормализация) является переходной ступенью от обработки по второй группе (отжиг) к обработке по третьей группе.

Закалка — нагрев выше A_{c3} с последующим быстрым охлаждением. При медленном охлаждении аустенит распадается на феррит + цементит при A_{c1} . С увеличением скорости охлаждения превращение происходит при более низких температурах. Ферритно-цементитная смесь по мере снижения A_{c1} становится все более мелкозернистой и твердой. Если же скорость охлаждения была так велика и переохлаждение было так значительно, что распада аустенита с выделением цементита и феррита не произошло, то распада твердого раствора не происходит и аустенит (γ -твердый раствор) превращается в мартенсит (пересыщенный твердый раствор углерода в Fe_α).

Неполная закалка — термическая операция, при которой нагрев производится до температуры, лежащей выше A_{c1} , но ниже A_{c3} , и в структуре стали сохраняется дозвтектоидный феррит (заэвтектоидный цементит).

Отпуск — нагрев закаленной стали ниже A_{c1} .

Для стали возможны различные виды ХТО в зависимости от элемента, диффундирующего в сталь.

Насыщение стали углеродом называется *цементацией*, азотом — *азотированием*, алюминием — *алитированием*, хромом — *хромированием*.

Термомеханическая обработка стали — нагрев до аустенитного состояния, деформация стали в аустенитном состоянии (в стабильном состоянии выше A_{c1} или в нестабильном переохлажденном состоянии) и окончательное охлаждение с протекающим при этом превращением наклепанного аустенита.

7.3. ОТЖИГ И НОРМАЛИЗАЦИЯ

Отжиг I рода. Этот вид отжига в зависимости от температурных условий устраняет химическую или физическую неоднородность, созданную предшествующими обработками. Характерная особенность этого отжига — устранение неоднородности происходит независимо от того, протекают ли в сплавах при такой обработке фазовые превращения или нет. Поэтому отжиг I рода можно производить при температуре выше или ниже температур фазовых превращений.

Диффузионный отжиг (гомогенизацию) применяют для слитков легированной стали с целью уменьшения дендритной ликвации, которая повышает склонность стали, обрабатываемой давлением, к хрупкому разрушению, к анизотропии свойств и возникновению таких дефектов, как слоистый излом (шиферность) и тонкие внутренние трещины, наблюдаемые в изломе в виде белых овальных пятен (флокенов).

Дендритная ликвация понижает пластичность и вязкость легированной стали, поэтому не только слитки, но и крупные отливки нередко подвергают гомогенизации.

Нагрев при диффузионном отжиге должен быть высоким (1100–1200 °C), так как в этом случае более полно протекают диффузионные процессы, необходимые для выравнивания в объеме стали. Скорость нагрева — 100–150 град/ч, продолжительность выдержки достигает 8–20 ч, общая продолжительность операции — 50–100 ч в зависимости от массы слитка. Для удаления поверхностных дефектов слитки после отжига подвергают нагреву при 670–680 °C в течение 1–16 ч, что снижает твердость.

После гомогенизации сталь имеет крупное зерно, которое измельчается при последующей обработке давлением или нормализацией и полным отжигом.

Рекристаллизационный отжиг — это нагрев холоднодеформированной стали выше температуры рекристаллизации, выдержка при этой температуре с последующим охлаждением. Его применяют перед или после холодной обработки давлением и как промежу-

точную операцию для снятия наклепа между операциями холодного деформирования.

Для углеродистых сталей с 0,08—0,2% С, чаще подвергаемых холодной деформации (прокатка, штамповка, волочение), температура отжига составляет 680—700 °С. Отжиг калиброванных прутков (холодная протяжка) из высокоуглеродистой легированной стали проводят при 730 °С. Продолжительность нагрева — 0,5—1,5 ч.

При отжиге стали кроме рекристаллизации феррита может протекать процесс коагуляции и сфероидизации цементита, в результате которого повышается пластичность и облегчается обработка давлением.

Низкий отжиг (для снятия остаточных напряжений). Если структура стали после горячей механической обработки хорошая и нет необходимости в перекристаллизации, а требуется снять внутренние напряжения, то нагревают сталь несколько ниже A_{c1} . Нагрев осуществляют со скоростью 100—150 град/ч до температуры 650—680 °С, а после выдержки — охлаждение на воздухе. Выдержка при температуре отжига составляет 0,5—1,0 ч на тонну слитка.

Отжиг стальных изделий для снятия напряжений проводят при 160—700 °С с медленным охлаждением. Например, многие детали прецизионных станков (ходовые винты, червяки, зубчатые колеса) нередко проходят отжиг (отпуск) после основной механической обработки при 570—600 °С в течение 2—3 ч и после окончательной механической обработки для снятия напряжений — при 160—180 °С в течение 2—2,5 ч. Отжиг для снятия сварочных напряжений проводят при 650—700 °С.

Отжиг II рода (фазовая перекристаллизация). Отжиг II рода основан на использовании диффузионных фазовых превращений при охлаждении металлов и сплавов. Это нагрев стали выше точек A_{c3} или A_{c1} ; выдержка с последующим медленным охлаждением, в результате которого фазовые превращения приводят к достижению практически равновесного структурного фазового состояния. После отжига для углеродистых сталей получается структура:

- феррит и перлит в доэвтектоидной стали;
- перлит в эвтектоидной стали;
- перлит и вторичный цементит в заэвтектоидной стали.

Отжиг является подготовительной операцией, понижающей прочность и твердость перед обработкой резанием. Измельчая зерно, снимая внутренние напряжения и уменьшая структурную неоднородность, он способствует повышению пластичности и вязкости по сравнению с соответствующими характеристиками, полученными после литья,ковки и прокатки.

Существуют следующие виды отжига II рода: полный, изотермический и неполный.

Полный отжиг. Основные цели полного отжига: устранение пороков структуры, возникших при предыдущей обработке (литье, горячей деформации, сварке и термообработке), снижение твердости стали перед обработкой резанием и снятие внутренних напряжений.

Этот вид отжига заключается в нагреве доэвтектоидной стали на 30–50 °С выше A_{c3} , выдержке при этой температуре для полного прогрева и завершения фазовых переходов и последующем медленном охлаждении. В этом случае ферритно-перлитная структура переходит при нагреве в аустенит, а затем при медленном охлаждении превращается обратно в феррит и перлит. Происходит полная перекристаллизация. Образуется мелкозернистая структура, обеспечивающая высокую вязкость и пластичность.

Изотермический отжиг. В этом случае с целью экономии времени сталь нагревают, как и для полного отжига, и сравнительно быстро охлаждают (чаще — переносом в другую печь) ниже A_{c1} на 50–100 °С (обычно 650 °С) и назначают изотермическую выдержку, необходимую для полного распада аустенита. Затем — охлаждение на воздухе.

Для ускорения отжига температуру изотермической выдержки следует выбрать близкой к температуре минимальной устойчивости переохлажденного аустенита в перлитной области.

Другое преимущество изотермического отжига — получение более однородной структуры, так как при этом температура по сечению при выдержке выравнивается и превращение по всему объему стали происходит при одинаковой степени охлаждения.

Изотермический отжиг улучшает обрабатываемость резанием, чистоту поверхности и уменьшает деформации при последующей термической и химико-термической обработке. Целесообразно подвергать изотермическому отжигу детали небольших размеров.

Неполный отжиг отличается от полного тем, что сталь нагревают до более низких температур (выше A_{c1} , но ниже A_{c3}) и медленно охлаждают. При этом происходит частичная перекристаллизация перлитной составляющей.

Неполному отжигу подвергают доэвтектоидные стали с целью снятия внутренних напряжений и улучшения обрабатываемости резанием в том случае, если предварительная горячая механическая обработка не привела к образованию крупного зерна.

Для заэвтектоидных сталей применяют только неполный отжиг. В этих сталях нагрев несколько выше A_{c1} (на 10–30 °С). Он вызывает

практически полную перекристаллизацию и позволяет получить зернистую структуру перлита вместо пластинчатой. Такой отжиг называется *сфероидизацией*. Охлаждение при этом медленное. Оно должно обеспечить распад аустенита на ферритно-перлитную смесь, сфероидизацию и коагуляцию образовавшихся карбидов при охлаждении до 620–680 °С.

Нормализация — это нагрев доэвтектоидной стали до температуры, превышающей A_{c3} на 50 °С, а в заэвтектоидной — выше A_{c1} на 50–60 °С, непродолжительная выдержка и охлаждение на воздухе. Нормализация вызывает полную фазовую перекристаллизацию и устраняет крупнозернистую структуру, полученную при литье, ковке, прокатке.

Ускоренное охлаждение на воздухе приводит к распаду аустенита при более низких температурах, что повышает дисперсность ферритно-цементитной структуры и увеличивает дисперсность сорбита и троостита. Это повышает на 10–15% прочность и твердость нормализованной средне- и высокоуглеродистой стали по сравнению с отожженной.

Назначение нормализации различно в зависимости от состава стали. Для низкоуглеродистых сталей нормализацию применяют вместо отжига. В результате твердость немного возрастает, но улучшается качество поверхности при резании.

Для среднеуглеродистых сталей нормализацию или нормализацию с высоким отпуском применяют вместо закалки и высокого отпуска (улучшения). Механические свойства при этом понижаются, но уменьшается деформация изделий по сравнению с полученной при закалке. Исключается вероятность образования трещин.

Высокоуглеродистые (заэвтектоидные) стали подвергают нормализации с целью устранения цементитной сетки.

Нормализацию с последующим отпуском (600–650 °С) часто применяют для исправления структуры легированных сталей вместо отжига.

7.4. ЗАКАЛКА

Закалкой называется термическая обработка, заключающаяся в нагревании стали до температуры выше критической A_{c3} для доэвтектоидной и выше A_{c1} — для заэвтектоидной или до температуры растворения избыточных фаз, в выдержке и последующем охлаждении со скоростью, превышающей критическую.

Минимальная скорость охлаждения, при которой аустенит превращается в мартенсит без структур перлитного типа, называется *критической скоростью закалки*.

В результате закалки из аустенита образуется неустойчивая метастабильная структура — мартенсит.

Мартенсит имеет высокую твердость: $HV = 850$. Твердость мартенсита тем выше, чем больше в нем углерода.

Кроме того, высокая твердость объясняется также наличием большого числа нарушений кристаллического строения, возникающих в процессе образования мартенсита.

Аустенит превращается в мартенсит в том случае, когда диффузионные процессы полностью подавляются, то есть становятся невозможными.

Превращение аустенита в мартенсит начинается при определенной температуре, называемой *температурой начала мартенситного превращения* M_n . Для того чтобы мартенситное превращение протекало, необходимо непрерывное охлаждение аустенита ниже точки M_n . Если охлаждение прекратить, то превращение аустенита в мартенсит остановится.

При достижении определенной температуры дальнейшее превращение аустенита в мартенсит прекращается. Эта температура называется *концом мартенситного превращения* M_k . Положение температур M_n , M_k не зависит от скорости охлаждения и определяется химическим составом стали. Чем больше углерода в аустените, тем ниже располагаются эти температуры. Все легирующие элементы, за исключением Co и Al, понижают M_n и M_k . Мартенситное превращение характеризуется высокой скоростью роста зародышей (1000–7000 м/с).

7.5. ВНУТРЕННИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ЗАКАЛЕННОЙ СТАЛИ

Внутренние напряжения возникают в результате неравномерного охлаждения поверхности и сердцевины изделия, увеличения объема и неоднородности мартенситного превращения по объему изделия. Напряжения, вызываемые этим превращением, называют *структурными* или *фазовыми*.

Неодинаковое распределение температуры по сечению изделия при быстром охлаждении сопровождается и неравномерным изменением объема. Поверхностные слои сжимаются быстрее, чем внутренние.

Различают внутренние напряжения I, II и III рода.

Напряжения I рода — это зональные внутренние напряжения, возникающие между отдельными зонами сечения и между различными частями детали. Чем больше скорость и неравномерность охлаждения, размеры детали, тем большего значения достигают внутренние напряжения I рода.

Напряжения II рода возникают внутри зерна или между соседними зернами вследствие того, что у них различные коэффициенты линейного расширения, или вследствие образования новых фаз. Внутренние напряжения II рода (их называют *структурными*) не зависят от скорости охлаждения. Структурные напряжения возникают в результате превращения аустенита в мартенсит. Мартенсит в первую очередь образуется на поверхности, а не в сердцевине. Так как превращение «аустенит → мартенсит» сопровождается увеличением объема, это приводит к образованию на поверхности временных сжимающих напряжений, а во внутренних слоях — растягивающих.

Напряжения III рода образуются внутри объема нескольких элементарных ячеек кристаллической решетки.

Внутренние напряжения I рода, влияние которых наиболее сильно, вызывают коробление детали и трещины, особенно если металл обладает малой пластичностью и если внутренние напряжения превзойдут значение предела прочности.

Напряжения, которые возникли и сохранились в детали в результате охлаждения, называют *остаточными*.

Закаленная сталь всегда находится в структурно-напряженном состоянии. Отпуск является необходимым средством снятия остаточных напряжений.

7.6. СПОСОБЫ ЗАКАЛКИ

В зависимости от состава стали, формы, размеров и требуемых от термически обработанной детали свойств следует выбирать способ закалки.

Основными способами закалки являются следующие.

1. Закалка в одном охладителе. Это наиболее простой способ. Нагретую до заданной температуры деталь погружают в закалочную жидкость, где она остается до полного охлаждения. Применяют при закалке несложных деталей из углеродистых и легированных сталей. Для деталей из углеродистых сталей диаметром более 2–5 мм закалочной жидкостью служит вода, а для деталей меньших размеров

и для многих легированных сталей — минеральное масло. Этот способ применяют и при механизированной закалке.

Для уменьшения внутренних напряжений деталь иногда не сразу погружают в жидкость, а некоторое время охлаждают на воздухе — подстуживают (закалка с подстуживанием).

2. Прерывистая закалка, или закалка в двух средах. Деталь сначала охлаждают в быстроохлаждающей среде (обычно в воде), а затем медленно охлаждают (деталь переносят в минеральное масло или охлаждают на воздухе). Мартенситный интервал происходит при сравнительно медленном охлаждении, что способствует уменьшению внутреннего напряжения. Этот способ применяют при закалке инструмента из высокоуглеродистых сталей. Практически трудно установить и отрегулировать время пребывания деталей в первой жидкости, так как оно исчисляется секундами.

3. Струйчатая закалка. Обрызгивание детали интенсивной струей воды обычно применяют тогда, когда требуется закалить части детали. При этом способе не образуется паровой рубашки, что обеспечивает более глубокую прокаливаемость, чем при простой закалке в воде.

4. Закалка с самоотпуском. В этом случае охлаждение изделия в закалочной среде прерывают, с тем чтобы в сердцевине изделия сохранилось еще некоторое количество теплоты. Под действием теплообмена температура в более сильно охлаждающихся поверхностных слоях повышается и сравнивается с температурой сердцевины. В результате происходит отпуск поверхности стали (самоотпуск). Эту закалку применяют, например, для таких инструментов, которые работают с ударными нагрузками и должны сочетать высокую твердость на поверхности с повышенной вязкостью в сердцевине (зубила, кувалды, молотки, керны и т.п.).

5. Ступенчатая закалка. Сталь после нагрева до температуры закалки охлаждают в среде, имеющей температуру выше точки M_n (180–250 °C), и выдерживают сравнительно короткое время. Затем изделие охлаждают до комнатной температуры на воздухе. В результате выдержки в закалочной среде достигается выравнивание температуры по сечению изделия до температуры закалочной ванны. Затем следует обычное медленное охлаждение, во время которого происходит закалка, то есть превращение аустенита в мартенсит, но менее полное, чем при непрерывной закалке. Сталь сохраняет большое количество остаточного аустенита. При ступенчатой закалке уменьшаются объемные изменения и возможность образования трещин.

Однако применение ступенчатой закалки ограничено предельным размером сечения детали — не более 8–10 мм. Сравнительно медленное охлаждение среды не позволяет достигнуть критической скорости закалки для более крупных деталей, и аустенит распадается при высоких температурах.

6. Изотермическая закалка. В отличие от ступенчатой при изотермической закалке необходимо выдерживать сталь в закалочной среде столько времени, чтобы успело закончиться изотермическое превращение аустенита.

Обычно температура изотермического распада аустенита лежит в интервале 250–300 °С. В результате изотермической закалки с распадом аустенита в этом пределе температур сталь обладает меньшей твердостью при любых способах закалки, но, как правило, повышенной вязкостью. В результате получается структура бейнита.

7.7. ОТПУСК

Отпуск заключается в нагреве закаленной стали до температуры ниже A_{c1} , выдержке при данной температуре и последующем охлаждении с определенной скоростью. Отпуск является окончательной операцией термообработки, после чего сталь получает требуемые свойства. Кроме того, отпуск полностью или частично устраняет внутреннее напряжение, возникшее при закалке. Эти напряжения снимаются тем полнее, чем выше температура отпуска.

Основное влияние на свойства стали оказывают температуры отпуска. Различают три вида отпуска.

Низкий отпуск проводят с нагревом до 150–200 °С, реже — до 240–250 °С. При этом снижаются внутренние напряжения, мартенсит закалки переходит в отпущенный (кубический) мартенсит, повышается прочность и несколько улучшается вязкость без заметного снижения твердости. Закаленная сталь (0,5–1,3% С) после низкого отпуска сохраняет высокую твердость, износостойкость, однако плохо выдерживает динамические нагрузки. Поэтому низкотемпературному отпуску подвергают режущий инструмент, измерительный инструмент из углеродистых и низколегированных сталей, а также детали, претерпевшие поверхностную закалку, цементацию, цианирование и нитроцементацию.

Продолжительность отпуска — 1–2,5 ч, а для изделий больших сечений и измерительных инструментов требуется более длительный отпуск.

Средний отпуск проводят при 350–500 °С. Такой отпуск обеспечивает сравнительно высокую твердость и прочность с хорошей

упругостью и достаточной вязкостью. Поэтому его применяют главным образом при обработке стали, предназначенной для изготовления пружин, рессор, а также для штампов, так как он обеспечивает высокий предел упругости, выносливости и релаксационную стойкость. Структура стали после среднего отпуска: троостит отпуска или троостит + мартенсит. Охлаждение — с температуры 400–450 °С — следует проводить в воде, что способствует образованию на поверхности сжимающих остаточных напряжений, которые увеличивают предел выносливости пружин.

Высокий отпуск проводят при 500–680 °С. Структура стали после этого — сорбит отпуска. Высокий отпуск создает наилучшее соотношение прочности и вязкости стали.

Закалка с последующим высоким отпуском повышает пределы прочности и текучести, относительное сужение и особенно ударную вязкость. Термообработку, состоящую из закалки и высокого отпуска, называют *улучшением*.

Улучшению подвергают среднеуглеродистые (0,3–0,5% С) конструкционные стали, к которым предъявляются высокие требования по пределу текучести, выносливости и ударной вязкости. Однако износостойкость улучшенной стали вследствие ее пониженной твердости не является высокой. Улучшение значительно повышает конструктивную прочность, уменьшает чувствительность к концентрациям напряжений, снижает температуру верхнего и нижнего порога хладноломкости.

Отпускная хрупкость. Обычно ударная вязкость с температурой отпуска увеличивается, а скорость охлаждения после отпуска не влияет на свойства. Но у некоторых конструкционных сталей наблюдается уменьшение ударной вязкости. Этот дефект называют отпускной хрупкостью.

7.8. СТАРЕНИЕ

Термин *отпуск* принято применять только к тем сплавам, которые были подвергнуты закалке с полиморфным превращением, а термин *старение* — в случае закалки без полиморфного превращения (после такой закалки фиксируется пересыщенный твердый раствор).

Как отпуск, так и старение — это разновидности термической обработки, в результате которой происходит изменение свойств закаленных сплавов. В отличие от отпуска после старения увеличиваются прочность, твердость, уменьшается пластичность.

Главным процессом при старении является распад пересыщенного твердого раствора, полученного в результате закалки. Таким

образом, старение сплавов связано с переменной растворимостью избыточной фазы, а упрочнение при старении происходит в результате дисперсных выделений при распаде пересыщенного твердого раствора и возникающих при этом внутренних напряжений.

Основное назначение старения — повышение прочности и стабилизация свойств сплавов.

Различают старение естественное, искусственное и после пластической деформации.

Естественным старением называют самопроизвольное повышение прочности (и уменьшение пластичности) закаленного сплава, происходящее в процессе его выдержки при нормальной температуре.

Искусственное старение. Нагрев ускоряет подвижность атомов, это интенсифицирует процесс диффузии. Повышение прочности, происходящее в процессе выдержки при повышенных температурах, называют искусственным старением.

Деформационное старение. Если закаленный сплав, имеющий структуру пересыщенного твердого раствора, подвергнуть пластической деформации, то это также ускоряет протекающие при старении процессы. Этот вид старения называют *деформационным*.

Старение охватывает все процессы, происходящие в пересыщенном твердом растворе, то есть процессы, подготавливающие выделение, и непосредственно процессы выделения. Для практики большое значение имеет инкубационный период — время, в течение которого в закаленном сплаве совершаются подготовительные процессы и он сохраняет высокую пластичность. Это позволяет проводить холодную деформацию непосредственно после закалки.

Если при старении происходят только процессы выделения, то такое явление называют *дисперсионным твердением*.

Практическое значение явления старения сплавов очень велико. Так, после старения увеличивается прочность и уменьшается пластичность низкоуглеродистой стали — в результате дисперсных выделений в феррите третичного цементита и нитридов. Кроме того, в сталях возможно одновременное протекание термического и деформационного старения.

Деформационное старение ухудшает штампуемость листовой стали. Поэтому многие углеродистые стали подвергают испытаниям на склонность к деформационному старению. Старение является основным способом упрочнения алюминиевых сплавов, некоторых сплавов меди, а также многих жаропрочных и других сплавов.

7.9. ОБРАБОТКА ХОЛОДОМ

Сущность термообработки холодом заключается в том, что у многих марок промышленных сталей температура окончания мартенситного превращения M_K лежит ниже 0°C , а следовательно, после закалки в структуре имеется остаточный аустенит. Чем ниже расположена точка M_K , тем больше остаточного аустенита в структуре закаленной стали.

С целью уменьшения количества остаточного аустенита сталь после закалки охлаждают до отрицательных температур. В результате происходит возобновление мартенситного превращения.

Увеличение количества мартенсита за счет аустенита вызывает повышение твердости, стабилизацию размеров, увеличение объема, повышение ферромагнитных характеристик.

Эффект обработки холодом определяется количеством превращенного при отрицательных температурах аустенита. Чем ниже лежит M_K , тем больше аустенита превращается в мартенсит, тем больший эффект от обработки.

Выдержка стали после закалки при комнатной температуре более 3–6 ч стабилизирует аустенит, и поэтому он в меньшем количестве превращается в мартенсит при дальнейшем охлаждении и, таким образом, уменьшает эффект обработки холодом. В данном случае обработку холодом выполняют сразу после закалки.

На практике обработку холодом применяют в следующих случаях: при обработке быстрорежущих сталей для сокращения продолжительности цикла термообработки и улучшения режущих свойств; при обработке высокохромистых сталей, в которых после закалки имеется большое количество остаточного аустенита; для повышения твердости и износостойкости цементованных деталей из углеродистых и легированных сталей; для стабилизации размеров калибров колец шарикоподшипников и других особо точных изделий; для повышения магнитных характеристик магнитов. Обработку холодом рекомендуется применять непосредственно после закалки.

Технологический режим термообработки складывается из закалки, обработки холодом и последующего отпуска (рис. 7.2). При термической обработке быстрорежущей стали широко применяют обработку холодом.

Закаленную сталь охлаждают до -80 — -100°C , то есть до температур ниже точки M_n этой стали. Затем для снятия внутренних напряжений сталь подвергают однократному отпуску (560°C).

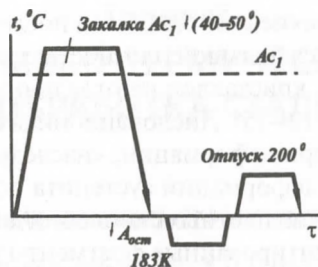


Рис. 7.2. Схема режима термической обработки стали холодом

7.10. ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА (ТМО) СТАЛИ

Этот метод обработки стали позволяет повысить ее механические свойства по сравнению с полученными при обычной закалке и отпуске. ТМО заключается в сочетании пластической деформации стали в аустенитном состоянии с ее закалкой. Формирование структуры закаленной стали при ТМО происходит при повышенной плотности дислокаций, обусловленных наклепом. Различают два основных вида ТМО:

- высокотемпературная (ВТМО) — сталь деформируют при температуре выше Ac_3 , при которой она имеет аустенитную структуру. Степень деформации составляет 20–30%, после деформации следует немедленная закалка во избежание развития рекристаллизации;
- низкотемпературная (НТМО) — сталь деформируют в температурной зоне существования переохлажденного аустенита в области его относительной устойчивости (400–600 °C); температура деформации должна быть выше точки M_n , но ниже температуры рекристаллизации. Степень деформации составляет 75–95%. Закалку осуществляют сразу после деформации. После закалки в обоих случаях следует низкотемпературный отпуск (100–300 °C). Такая комбинированная ТМО позволяет получить очень высокую прочность.

Очень важно, что после ТМО возрастает пластичность. НТМО можно рассматривать как холодную обработку давлением, так как она проводится при температуре ниже температуры рекристаллизации. ВТМО обеспечивает большой запас пластичности и лучшую конструктивную прочность, повышает ударную вязкость при комнатных и низких температурах, понижает порог хладноломкости, чувствительность к отпускной хрупкости.

Высокие механические свойства стали после термомеханической обработки объясняются большой плотностью дислокаций в мартенсита, дроблением его кристаллов на отдельные части со взаимной дезориентировкой до $10\text{--}15^\circ$. Дислокационная структура, формирующаяся в аустените при деформации, «наследуется» после закалки мартенситом. После деформации аустенита последующая закалка приводит к образованию плотных скоплений дислокаций, сочленяющих сильно разориентированные фрагменты мартенсита.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что понимают под режимами термической обработки?
2. Какие существуют виды термической обработки?
3. Каковы особенности термической и термомеханической обработки?
4. Какие виды термообработки применяют для сталей?

Глава 8

ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ

8.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Химико-термической обработкой (ХТО) называется процесс изменения химического состава, микроструктуры и свойств поверхностных слоев деталей. Изменение химического состава поверхностных слоев достигается в результате их взаимодействия с окружающей средой (твердой, жидкой или газообразной), в которой осуществляется нагрев. По сравнению с поверхностной закалкой (например, высокочастотной), ХТО, уступая ей в производительности, имеет некоторые особенности и преимущества:

- независимость от внешней формы изделия. С одинаковым успехом можно обрабатывать и сложные, и простые формы изделия, получая по всей поверхности упрочненный слой одинаковой толщины, тогда как при поверхностной закалке внешняя форма изделия имеет большое значение: у многих деталей внешняя форма такова, что исключает возможность применения поверхностной закалки;
- большее, чем при поверхностной закалке, различие между свойствами сердцевины и поверхности. При ХТО разница в свойствах определяется различием в строении и составе, а при поверхностной закалке — только различием в строении;
- последствия перегрева поверхности могут быть устранены последующей термообработкой, тогда как при поверхностной закалке перегрев не может быть устранен, поскольку она является последней операцией.

Процесс ХТО включает три элементарные стадии:

- выделение диффундирующего элемента в атомарном состоянии (диссоциация): $2\text{NH}_3 \rightarrow 2\text{N} + 3\text{H}_2$; $\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2$ и т.д.;
- контактирование атомов диффундирующего элемента с поверхностью стального изделия и проникновение их в решетку железа (адсорбция);
- диффузию перемещения атомов насыщающего элемента вглубь металла.

Скорость диффузии атомов насыщенного элемента в решетку неодинакова. При насыщении углеродом или азотом, образующим

твердые растворы внедрения, диффузия протекает быстрее, чем при образовании твердых растворов замещения.

Границы зерен являются участками, в которых диффузионные процессы облегчены из-за наличия в этих местах дефектов кристаллического строения.

Развитие процесса диффузии приводит к образованию в поверхностных слоях диффузионной зоны, состоящей из твердых растворов и химических соединений.

Слой материала детали у поверхности насыщения, отличающийся от исходного по химическому составу, называется *диффузионным слоем*. Зона материала, не тронутая воздействием окружающей активной среды, называется *сердцевиной*.

Под *общей толщиной диффузионного слоя* понимают кратчайшее расстояние от поверхности насыщения до сердцевины. *Эффективной толщиной диффузионного слоя* называют часть общей толщины диффузионного слоя, которая определяется до участка, характеризующего базовым параметром. В качестве базового параметра принимают или концентрацию диффундирующего элемента, или свойства (твердость), или структурный признак.

Толщина диффузионного слоя зависит от температуры и продолжительности насыщения (рис. 8.1).

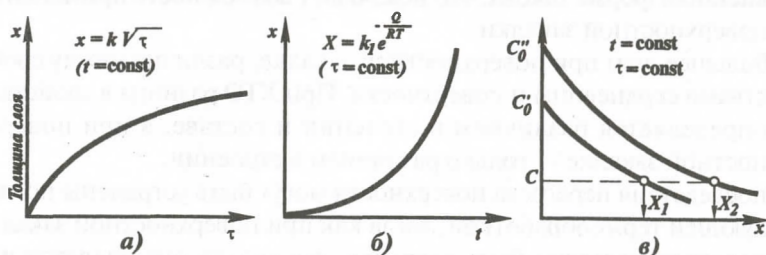


Рис. 8.1. Зависимость толщины диффузионного слоя от продолжительности насыщения (а), температуры (б) и изменение концентрации по толщине диффузионного слоя (в)

Продолжительность процесса ХТО определяется требуемой глубиной диффузионного слоя. При постоянных параметрах процесса (температура и др.) глубина диффузионного слоя подчиняется соотношению

$$x = k\sqrt{\tau},$$

где x — толщина слоя; τ — продолжительность процесса; k — постоянная, зависящая от коэффициента диффузии.

Качественными и количественными характеристиками ХТО являются толщина диффузионного слоя, распределение концентрации диффундирующего элемента по толщине слоя, фазовый состав и свойства слоя (твёрдость, пластичность, сопротивление износу, коррозионная стойкость и др.).

При определении толщины диффузионного слоя, полученного при насыщении стали металлами и неметаллами, обычно указывают не полную толщину слоя, а толщину до определенной твердости — эффективную толщину диффузионного слоя.

8.2. ЦЕМЕНТАЦИЯ

Цементацией называется процесс насыщения поверхностного слоя стали углеродом. Различают два основных вида цементации: *твёрдыми углеродсодержащими смесями (карбюризаторами)* и *газовую*. Целью цементации является получение твёрдой и износостойкой поверхности, что достигается обогащением поверхностного слоя углеродом и последующей закалкой с низким отпускком. Цементация и последующая термообработка одновременно повышают и предел выносливости (зубчатые колеса, пальцы, кулачковые валы, червяки, толкатели клапанов, распределительные валы).

Для цементации обычно используют низкоуглеродистые стали (0,12–0,23% С). Выбор таких сталей необходим для того, чтобы сердцевина изделия, не насыщенная углеродом, сохраняла высокую вязкость после закалки.

Цементация деталей осуществляется после механической обработки с припуском на шлифование 0,05–0,1 мм или после окончательной обработки. Во многих случаях цементации подвергают часть детали: тогда участки, не подлежащие упрочнению, защищают слоем меди (0,02–0,05 мм), который наносят электролитическим способом, или изолируют специальными обмазками, состоящими из огнеупорной глины, песка, асбеста или окиси алюминия.

Диффузия углерода в сталь возможна только в том случае, если углерод находится в атомарном состоянии, который получается диссоциацией газов, содержащих углерод (СО, СН₄ и т.д.). Атомарный углерод адсорбируется на поверхности стали и диффундирует вглубь металла.

Как правило, цементацию проводят при температурах выше точки Ас₃, при которых устойчив аустенит. Аустенит растворяет большое количество углерода. Атомы углерода диффундируют в решетку Fe_γ.

При температуре цементации диффузионный слой состоит только из аустенита, а после медленного охлаждения — из продуктов его распада: феррита и цементита.

Цементованный слой имеет переменную концентрацию С по глубине. Поверхностная зона, в которой углерода больше 0,8–0,9%, имеет структуру перлит + цементит (заэвтектоидная зона); затем следует зона с содержанием углерода 0,8% — эвтектоидная зона; наконец — доэвтектоидная зона, содержащая углерода менее 0,7%, плавно переходящая в сердцевину. За *эффективную толщину цементованного слоя* принимают сумму заэвтектоидной, эвтектоидной и половины переходной (доэвтектоидной) зон или глубину распространения контрольной твердости свыше определенного значения.

Толщина цементованного слоя обычно составляет 0,5–1,8 мм. Концентрация углерода в поверхностном слое должна составлять 0,8–1,0%. Для получения максимального сопротивления контактной усталости количество углерода может быть повышено до 1,1–1,2%. Более высокое содержание углерода ведет к образованию значительного количества вторичного цементита, повышающего хрупкость.

Легирующие элементы, присутствующие в стали, оказывают влияние на структуру цементуемого слоя, механизм его образования и скорость диффузии. Однако легирующие элементы присутствуют в цементуемых сталях в таком количестве, что практически не влияют на толщину слоя.

Карбюризаторы. Среда, поставляющая углерод к поверхности цементуемых деталей, называется *карбюризатором*. Применяются два основных способа цементации: в твердом и газовом карбюризаторах.

В качестве *твердого карбюризатора* используют смесь древесного угля с углекислыми солями, являющимися активизаторами (например, BaCO_3 и Na_2CO_3) в количестве 10–40% от массы угля. Промышленный карбюризатор имеет следующий состав: 20–25% BaCO_3 ; 3–5% CaCO_3 ; 0,06% S; до 0,5% SiO_2 ; остальное — уголь.

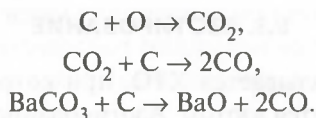
Детали, подлежащие цементации, укладывают в сварные стальные или литые чугунные прямоугольные или цилиндрические *ящики*. Изделия в ящиках плотно укладывают попеременно с карбюризатором. Ящики закрываются крышками, кромки которых обмазывают огнеупорной глиной, чтобы не было свободного выхода газов, образующихся при нагреве. После этого ящики помещают в печь.

Время нагрева до температуры цементации (910–930 °С) рассчитывают из соотношения 7–9 мин на каждый сантиметр размера ящика. Продолжительность выдержки для ящика размером 150 мм

составляет 5,5–6,5 ч для слоя толщиной 0,7–9 мм и 9–11 ч для слоя толщиной 1,2–1,5 мм.

После цементации ящики охлаждают на воздухе до 400–500 °С и затем раскрывают.

При нагреве внутри цементационного ящика образуется окись углерода в результате взаимодействия кислорода воздуха и разложения углекислого бария:

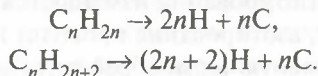


На поверхности стальных деталей окись углерода диссоциирует:



Происходит реакция обновления: $\text{BaO} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{BaCO}_3$.

В качестве *газового карбюризатора* чаще всего используют специально приготовленный газ, содержащий в определенном соотношении предельные углеводороды и некоторое количество окиси углерода. Разложение этих соединений приводит к образованию активного атомарного углерода:



Наибольшее распространение в качестве газовых карбюризаторов получили предельные углеводороды (CH_{2n+2}) — метан, этан, пропан, бутан и др., из них метан — в виде естественного газа (92–96% CH_4). В цементующем газе количество тяжелых углеводородов и метана ограничивают, чтобы уменьшить выделение сажи и смолистых веществ, отложение которых на поверхности деталей затрудняет цементацию.

Кроме естественного газа при цементации применяют бензол, который в виде капель подают непосредственно в муфель цементационной печи, где образуется газ, состоящий из метана, окиси углерода и свободного водорода. Если поверхность стали не поглощает весь выделяющийся углерод (адсорбция отстает от диссоциации), то свободный углерод, кристаллизуясь из газовой фазы, откладывается в виде пленки сажи на детали, затрудняя процесс цементации.

Практически цементацию проводят при 900–930 °С, но имеется тенденция повышать температуру цементации до 950–970 °С и выше.

Газовая цементация имеет ряд преимуществ по сравнению с цементацией в твердом карбюризаторе, поэтому ее широко применяют на заводах, изготавливающих детали массовыми партиями. Этот

способ позволяет полностью механизировать и автоматизировать весь процесс, начиная от загрузки и кончая термической обработкой после цементации. На газовую цементацию затрачивается меньше времени, чем на цементацию в твердом карбюризаторе, так как исключается время на прогрев и охлаждение массивных ящиков с малотеплопроводным карбюризатором.

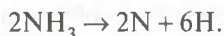
8.3. АЗОТИРОВАНИЕ

Азотированием называется ХТО, при которой поверхностный слой детали насыщается азотом. Азотирование чаще всего используют для повышения износостойкости и усталостной прочности деталей машин. Азотирование повышает и коррозионную стойкость в атмосферных условиях.

Азотированные слои могут иметь очень высокую твердость: $HV = 1000-1200$, что существенно превосходит твердость, получаемую после цементации и закалки: $HV = 750-950$. Однако азотирование используют реже, чем цементацию, из-за большой длительности процесса и меньшей толщины получаемого упрочненного слоя. Размеры изделия после азотирования изменяются мало, поэтому, в отличие от цементации, азотирование проводят на готовых изделиях, прошедших окончательную термообработку (закалку с высоким отпусканием) и доведенных шлифовкой до точного размера. Достоинством азотирования является также сохранение твердости при нагреве до $500-600\text{ }^{\circ}\text{C}$, поэтому часто азотируют гильзы цилиндров и штоки клапанов. Твердость цементованного слоя, имеющего мартенситную структуру, сохраняется только до $200-225\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Азотирование проводят в аммиаке при температуре $500-600\text{ }^{\circ}\text{C}$. При нагреве аммиак диссоциирует с выделением атомарного азота; последний адсорбируется, а затем растворяется в стали.

При азотировании изделия загружают в герметичные печи, куда поступает аммиак NH_3 заданного расхода. При нагреве он диссоциирует по реакции



Атомарный азот, имеющий высокую активность, поглощается поверхностью и диффундирует вглубь детали.

В зависимости от условий работы деталей различают *две разновидности азотирования*: для получения высокой твердости поверхности и износостойкости (твердостное азотирование) и для улучшения коррозионной стойкости (антикоррозионное азотирование).

В первом случае процесс продолжается от 24 до 90 ч (скорость азотирования составляет около 0,01 мм/ч). Содержание азота в поверхностном слое — до 10–12%, толщина слоя — 0,3–0,6 мм, твердость $HV = 1000–1200$.

Для сокращения длительности процесса прибегают к двухступенчатому азотированию: сначала температуру поддерживают на уровне 500–520 °С, а заканчивают процесс при 550–600 °С. Охлаждение после азотирования проводят вместе с печью в потоке аммиака.

Азотированию подвергают цилиндры моторов и насосов, шестерни, пресс-формы для литья под давлением, штампы, пуансоны и т.д.

Во втором случае (если азотирование проводится только с целью увеличения коррозионной стойкости) длительность процесса существенно снижается.

В настоящее время для активизации процессов в газовой среде и адсорбции на насыщаемой поверхности используют ионизационное азотирование (азотирование в тлеющем разряде). Процесс происходит в замкнутом контейнере, заполненном азотом или аммиаком, при давлении 5–10 мм ртутного столба. Азотируемая деталь, служащая катодом, непрерывно бомбардируется ионами азота и при этом разогревается до температуры азотирования 500–520 °С. Анодом может служить контейнер. Рабочее напряжение между анодом и катодом поддерживается в пределах 600–800 В. Азотирование в тлеющем разряде приводит к сокращению времени процесса и получению менее хрупкого слоя. Азотированные детали имеют серый цвет.

Азотирование в жидкой среде. Процесс проводят при 570 °С в течение 0,5–3,02 мин в расплавленных цианистых солях (85% соли, содержащей 40% $KCNO$ и 60% $NaCN + 15\% Na_2CO_3$ или 55% карбамида $[(NH_2)_2CO] + 45\% Na_2CO_3$), через которые пропускают сухой воздух. Соли расплавляются в тигле из титана. Вследствие низкой температуры в сталь диффундирует в основном азот, образующийся при разложении цианистых солей.

8.4. НИТРОЦЕМЕНТАЦИЯ (ЦИАНИРОВАНИЕ)

Нитроцементацией называют совместное диффузионное насыщение поверхностного слоя стальных изделий углеродом и азотом. Установлено, что при одновременной диффузии углерода и азота ускоряется диффузия углерода и температура насыщения может быть понижена до 850 °С.

Нитроцементованные поверхности обладают достоинствами как цементованных, так и азотированных слоев, высокой твердостью и коррозионной стойкостью в атмосферных условиях. Одновременно обеспечивается повышенный предел выносливости деталей, работающих при переменных нагрузках.

В зависимости от среды, в которой осуществляют процесс, различают жидкостную и газовую нитроцементацию.

Жидкостную нитроцементацию (цианирование) проводят в расплавленных цианистых солях. Наиболее широкое использование находят цианистые ванны, содержащие смеси солей: цианистый натрий NaCN — 20–25%; хлористый натрий NaCl — 20–50%; углекислый натрий Na_2CO_3 — 25–50%.

При высоких температурах в ванне протекают реакции, в результате которых образуются атомарный углерод и атомарный азот, которые диффундируют в поверхностный слой стали. Цианированный слой обладает высокой твердостью ($\text{HRC} = 58\text{--}62$) и хорошо сопротивляется износу. Относительно тонкий слой (0,2–0,5 мм) достаточен для повышения усталостной прочности и износостойкости деталей небольших размеров и работающих при невысоких удельных нагрузках.

Газовую нитроцементацию проводят в смеси науглероживающих газов и аммиака. В качестве цементующих используют те же газы, что и для газовой цементации; аммиак добавляют в количестве 20–30% при низкотемпературной нитроцементации и 3–7% при высокотемпературной.

Процесс осуществляется в печах, в рабочее пространство которых раздельно подаются цементующий газ и аммиак.

Нитроцементацию применяют для получения как тонких, так и толстых (до 1,5–2,0 мм) упрочненных слоев.

При температурах процесса 530–560 °С содержание углерода в слое повышается незначительно; основное упрочнение связано с поглощением азота. Наиболее широко низкотемпературную нитроцементацию применяют для повышения стойкости режущих инструментов, изготовленных из красностойких сталей — быстрорежущих, высокохромистых.

Низкотемпературной газовой нитроцементации подвергают также трущиеся детали машин, работающие при небольших удельных нагрузках: штоки клапанов автомобильных двигателей, втулки, зубчатые колеса.

8.5. БОРИРОВАНИЕ

Борированием называется ХТО, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали бором при нагревании в соответствующей среде. Борирование чаще выполняют при электролизе расплавленной буры ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$). Температура насыщения 930–950 °С при выдержке 2–6 ч. Процесс можно вести и без электролиза в ваннах с хлористыми солями (NaCl , BaCl_2), в которые добавляют 20% ферробора или 10% карбида бора (B_4C). Хорошие результаты получаются при газовом борировании. В этом случае насыщение ведут при 850–900 °С в среде диборана (B_2H_6) или треххлористого бора (BCl_3) в смеси с водородом.

Диффузионный слой состоит из боридов FeB и Fe_2B . Толщина слоя — 0,1–0,2 мм. Борированный слой обладает высокими твердостью ($\text{HV} = 1800\text{--}2000$), стойкостью, окислительной стойкостью (до 800 °С) и теплостойкостью.

Борирование применяют для повышения износостойкости втулок грязевых нефтяных насосов; дисков пяты турбобура; вытяжных, гибочных и формовочных штампов; деталей пресс-форм и машин для литья под давлением. Износостойкость деталей после борирования возрастает в 2–10 раз.

8.6. ДИФфуЗИОННАЯ МЕТАЛЛИЗАЦИЯ (НАСЫЩЕНИЕ МЕТАЛЛАМИ)

Диффузионная металлизация — процесс диффузионного насыщения поверхности слоев стали различными металлами. Изделие, поверхность которого обогащена этими элементами, приобретает ценные свойства, к числу которых относятся высокая жаростойкость, коррозионная стойкость, повышенная износостойкость и твердость. Как и при других видах ХТО, диффузионную металлизацию можно проводить в твердых, жидких и газообразных средах.

При *твердой диффузионной металлизации* металлизатором является ферросплав (феррохром, ферросилиций, ферроалюминий — сплавы железа с хромом, кремнием, алюминием и т.д. с высоким содержанием этих элементов) с добавлением хлористого аммония (NH_4Cl). В результате реакции металлизатора с HCl и Cl_2 образуются летучие соединения хлора с металлом (AlCl_3 , CrCl_2 , SiCl_4), которые при контакте с металлической поверхностью диссоциируют с образованием свободных атомов.

Жидкую диффузионную металлизацию проводят погружением детали в расплавленный металл (например, алюминий).

Газовую диффузионную металлизацию проводят в газовых средах, являющихся хлоридами различных металлов.

В зависимости от метода переноса диффузионного элемента на насыщенную поверхность различают следующие основные способы диффузионной металлизации:

- погружением в расплавленный металл, если диффундирующий элемент имеет низкую температуру плавления (Al, Zn);
- из расплавленных солей, содержащих диффундирующий элемент (с электролизом и без него);
- из сублимированной фазы путем испарения диффундирующего элемента;
- из газовой фазы (контактным и неконтактным путем), состоящей из галогенных соединений диффундирующего элемента.

В последние годы насыщение металлами (например, хромом) проводят путем испарения диффундирующего элемента в вакууме. Ниже дана характеристика наиболее часто применяемых процессов диффузионной металлизации.

Алитирование — это насыщение поверхности стали алюминием. В результате алитирования сталь приобретает высокую окислительную стойкость (до 850–900 °С) и коррозионную стойкость в атмосфере. При алитировании в порошкообразных смесях чистые детали вместе со смесью упаковывают в металлический контейнер. В рабочую смесь входят порошок алюминий (25–50%) или ферралюминий (50–75%), окись алюминия (25–50%) и хлористый алюминий (1,0%). Процесс осуществляется при 900–1000 °С в течение 3–12 ч.

Реже применяют алитирование в ваннах с расплавленным алюминием. Алитируемые детали погружают в расплавленный алюминий (92–94% Al; 6–8% Fe). Железо добавляют для того, чтобы предотвратить растворение обрабатываемых деталей в алюминии. Процесс проводят при 700–800 °С в течение 45–90 мин.

Алитирование в расплавленном алюминии отличается от алитирования в порошкообразных смесях простотой метода, быстротой и более низкими температурами.

Основной недостаток процесса — налипание алюминия на поверхность деталей.

Хромирование — поверхностное насыщение хромом. Используют для повышения коррозионной стойкости, кислотостойкости, окислительной стойкости (до 850 °С) и т.д.

Хромирование средне- и высокоуглеродистых сталей повышает их твердость и износостойкость. Его чаще всего проводят в порошкообразных смесях (50% металлического хрома или феррохрома; 49%

окиси алюминия и 1% хлористого алюминия) при температуре 1000–1050 °С.

Диффузионный слой, получаемый при хромировании углеродистых сталей, состоит из карбидов хрома $(\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3$ и $(\text{Fe}, \text{Cr})_{23}\text{C}_6$. Карбидный слой имеет высокую твердость: $\text{HV} = 1200\text{--}1300$. Толщина хромированного слоя достигает 0,15–0,20 мм при 6–15 ч.

Иногда применяют хромирование в вакууме. Изделия засыпают кусочками (диаметром 1–3 мм) хрома в стальном или керамическом тигле и помещают в вакуумную печь (разрежение 1,3–0,13 Па). При высоких температурах (960–1000 °С) хром испаряется и диффундирует в сталь.

Хромирование проводят для пароводяной арматуры, клапанов, вентилях, а также для деталей, работающих в агрессивных средах.

Силицирование — процесс насыщения поверхности стали кремнием. В результате силицирования сталь приобретает высокую коррозионную стойкость в морской воде и различных кислотах, повышенную износостойкость. Кроме того, силицирование резко повышает окалинностойкость молибдена и некоторых других металлов и сплавов.

Силицированный слой представляет собой твердый раствор Si в α -железе и, несмотря на низкую твердость ($\text{HV} = 200\text{--}300$) и значительную пористость, после пропитки маслом при 170–200 °С имеет повышенную износостойкость.

Силицирование можно проводить в порошкообразных смесях, состоящих из 60% ферросилиция; 39% окиси алюминия и 1% хлористого аммония; но наиболее часто применяют газовое силицирование. В печи с вращающимися ретортами засыпают детали и куски ферросилиция или карбида кремния. Через реторты пропускают хлор, который взаимодействует с кремнием и образует SiCl_4 .

В результате последующих химических реакций SiCl_4 способствует образованию атомарного кремния, который адсорбируется на поверхности изделия и диффундирует вглубь металла. При газовом силицировании при 1000 °С в течение 2–4 ч образуется слой толщиной 0,5–1,0 мм.

Силицированию подвергают детали, применяемые в оборудовании химической, бумажной и нефтяной промышленности.

В последние годы разработаны и получают промышленное внедрение новые процессы поверхностного насыщения металлов — титанирование (насыщение титаном) и цинкование (насыщение цинком).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите преимущества и недостатки химико-термической обработки сталей.
2. Какие стадии включает в себя технологический процесс химико-термической обработки?
3. В чем заключаются особенности цементации твердыми и газовыми карбюризаторами?
4. В каких случаях применяют цементацию? азотирование? нитроцементацию? борирование?
5. Какие свойства поверхности можно получить за счет диффузной металлизации?

Раздел IV СТАЛИ И ЧУГУНЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Глава 9 КОНСТРУКЦИОННЫЕ СТАЛИ

Сталь — основной металлический материал, широко применяемый для изготовления машин, приборов и инструментов. Ее широкое использование обусловлено сочетанием целого комплекса механических, физико-химических и технологических свойств. Кроме того, сталь сравнительно недорога, и ее можно производить в большом количестве.

Развитие техники ведет к повышению рабочих параметров машин и приборов, предъявляет все возрастающие требования к свойствам и качеству стали. В связи с этим разрабатываются новые марки стали, совершенствуются процессы ее получения.

9.1. КЛАССИФИКАЦИЯ СТАЛЕЙ

Стали классифицируют по химическому составу, назначению, качеству, степени раскисления и структуре.

По *химическому составу* стали классифицируют на углеродистые и легированные. По концентрации углерода и те, и другие подразделяют на низкоуглеродистые (0,3% С), среднеуглеродистые (0,3—0,7% С) и высокоуглеродистые (выше 0,7% С). Легированные стали в зависимости от количества введенных элементов подразделяют на низко-, средне- и высоколегированные (соответственно 5%; 5—10%; более 10% количества легирующих элементов).

По *назначению* стали подразделяют на конструкционные, инструментальные и стали специального назначения с особыми свойствами.

По *качеству* стали классифицируют на стали *обыкновенного качества*, *качественные*, *высококачественные* и *особо высококачественные*. Под качеством стали понимают совокупность свойств, определяемых металлургическим процессом ее производства. Однород-

ность химического состава, строения и свойств стали, а также ее технологичность во многом зависят от содержания газов (O_2 , N, H) и вредных примесей серы и фосфора. Газы являются скрытыми примесями, которые трудно определить количественно, поэтому нормы содержания вредных примесей служат основным показателем для разделения сталей по качеству. Стали обыкновенного качества выплавляют только углеродистыми (до 0,5% C), качественные и высококачественные — углеродистыми и легированными, особо высококачественные — легированными.

По *способу раскисления* и характеру затвердевания сталь классифицируют на *спокойную, полуспокойную и кипящую*.

Раскисление — процесс удаления из жидкого металла кислорода.

Легированные стали производят спокойными, углеродистые — спокойными, полуспокойными и кипящими.

По *структуре* классифицируют на стали в отожженном и нормализованном состояниях. В зависимости от структуры в *отожженном* (равновесном) состоянии стали разделяют на шесть классов:

- 1) доэвтектоидные, имеющие в структуре избыточный феррит;
- 2) эвтектоидные, структура которых состоит из перлита;
- 3) заэвтектоидные, имеющие в структуре вторичные, выделяющиеся из аустенита, карбиды;
- 4) ледебуритные, содержащие в структуре первичные (эвтектические) карбиды;
- 5) аустенитные;
- 6) ферритные.

По структуре после *нормализации* стали подразделяют на следующие основные классы: перлитный, мартенситный, аустенитный, ферритный.

Стали *перлитного класса* имеют невысокую устойчивость переохлажденного аустенита. При охлаждении на воздухе они приобретают структуру перлита, сорбита или троостита, в которой могут присутствовать также избыточные феррит или карбиды. К сталям перлитного класса относят углеродистые и низколегированные стали. Это большая группа дешевых, широко применяемых сталей.

Стали *мартенситного класса* отличаются высокой устойчивостью переохлажденного аустенита. Для таких сталей скорость охлаждения на воздухе оказывается больше критической скорости заковки; при охлаждении на воздухе они закаливаются на мартенсит. К этому классу относят средне- и высоколегированные стали.

Стали *аустенитного класса* из-за повышенного количества никеля или марганца (обычно в сочетании с хромом) имеют интервал мар-

тенситного превращения ниже 0°C и сохраняют аустенит при комнатной температуре. Распад аустенита в перлитной и промежуточной области отсутствует.

В сталях с высоким содержанием элементов, сужающих γ -область, при определенной их концентрации исчезает γ -превращение. Подобные стали относят к *ферритному классу*.

Рассмотренная классификация относится только к нормализованным сталям. Если условия охлаждения изменить, то структура стали тоже может измениться. Если сталь перлитного класса охладить с большей скоростью, то можно получить мартенсит; при охлаждении стали мартенситного класса с меньшей скоростью — перлит, после обработки стали аустенитного класса холодом — мартенсит.

Легированные стали доэвтектоидного, заэвтектоидного и перлитного классов наиболее широко применяют для изготовления деталей конструкций и инструмента. Стали мартенситного класса применяют ограниченно. Стали аустенитного и ферритного классов имеют особые физические и химические свойства (коррозиестойкие, жаропрочные и др.). Стали ледебуритного класса применяют как инструментальные. Наиболее типичной сталью данного класса является быстрорежущая сталь.

9.2. ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДА И ПОСТОЯННЫХ ПРИМЕСЕЙ НА СВОЙСТВА СТАЛЕЙ

Сталь промышленного производства — сложный по составу железоуглеродистый сплав. Кроме железа и углерода (основных компонентов), а также легирующих элементов (для легированных сталей) сталь содержит некоторое количество постоянных и случайных примесей.

Углерод оказывает основное влияние на свойства стали. После отжига ее структура представляет собой смесь феррита и цементита, причем количество последнего увеличивается пропорционально содержанию углерода.

Феррит малопрочен и пластичен. Цементит тверд и хрупок. В связи с этим по мере повышения концентрации углерода повышаются прочность и твердость, снижаются пластичность и вязкость стали.

Влияние углерода еще более значительно при неравновесной структуре стали. После закалки прочность и твердость резко возрастают с увеличением содержания углерода. При низком отпуске эти

свойства полностью определяются концентрацией углерода в твердом растворе (рис. 9.1).

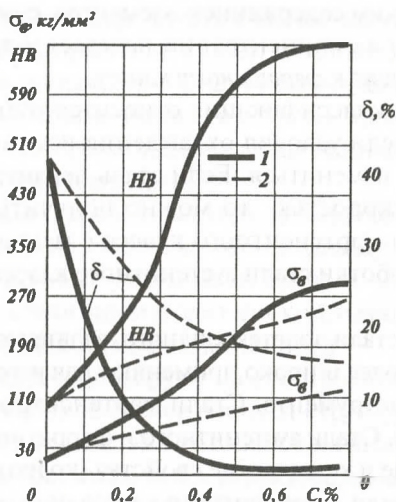


Рис. 9.1. Диаграмма изменения механических свойств углеродистой стали в зависимости от содержания в ней углерода:

1 — в закаленном состоянии; 2 — в отожженном состоянии

Углерод изменяет технологические свойства стали: обрабатываемость резанием, давлением; свариваемость.

Увеличение содержания углерода вследствие ухудшения теплопроводности стали ведет к снижению ее обрабатываемости резанием. При отделении стружки от более прочной стали увеличивается количество выделяемой теплоты, что вызывает отпуск инструмента и снижение его стойкости.

Между тем вязкие низкоуглеродистые стали также плохо обрабатываются из-за образования некачественной поверхности и трудноудаляемой стружки. Лучшей обрабатываемостью резанием обладают стали, содержащие 0,3–0,4% С.

С увеличением содержания углерода снижаются технологическая пластичность, способность деформироваться в горячем и холодном состояниях. Для сложной холодной штамповки содержание углерода ограничивается до 0,1%.

Углерод также затрудняет свариваемость стали. Хорошей свариваемостью отличаются низкоуглеродистые стали. Сварка средне- и особенно высокоуглеродистых сталей требует применения подо-

грева, замедленного охлаждения и других технологических операций, предупреждающих образование трещин.

Постоянные примеси в стали: марганец, кремний, сера, фосфор, а также газы: кислород, азот, водород.

Марганец — полезная примесь; вводится в сталь для раскисления и остается в ней в количестве 0,3–0,8%. Марганец уменьшает вредное влияние кислорода и серы.

Кремний — полезная примесь; вводится в качестве активного раскислителя и остается в стали в количестве 0,4%.

Сера — вредная примесь, вызывающая красноломкость — хрупкость при горячей обработке давлением; в стали находится в виде сульфидов. Сульфиды FeS образуют с железом эвтектику, отличающуюся низкой температурой плавления (988 °С) и располагающуюся по границам зерен. При горячей деформации зерна оплавляются и сталь хрупко разрушается.

От красноломкости сталь предохраняет марганец, который связывает серу в сульфиды MnS, исключающие образование легкоплавкой эвтектики. Устраняя красноломкость, сульфиды MnS, так же как и другие неметаллические включения (оксиды, нитриды), нарушают однородность строения стали, снижают пластичность и вязкость, усталостную прочность, ухудшают свариваемость и коррозионную стойкость. Поэтому содержание серы в стали строго лимитируют. Положительное влияние серы в стали проявляется лишь в улучшении обрабатываемости резанием.

Фосфор — вредная примесь; растворяется в феррите, упрочняет его, но снижает вязкость при пониженных температурах, то есть вызывает хладноломкость. Фосфор повышает порог хладноломкости. Хрупкость стали, вызванная фосфором, тем выше, чем больше в ней углерода.

Кислород, азот, водород — вредные скрытые примеси. Их влияние наиболее сильно проявляется в снижении пластичности и повышении склонности стали к хрупкому разрушению. Кислородные включения вызывают красно- и хладноломкость, снижают прочность. Повышенное количество азота вызывает деформационное старение. Атомы азота в холоднодеформированной стали скапливаются на дислокациях. Сталь упрочняется, становится малопластичной. Старение медленно развивается при комнатной температуре и ускоряется при нагреве до 250 °С. Особенно оно нежелательно для листовой стали ($\leq 0,1\%$ С), предназначенной для холодной штамповки. Последствия старения — разрывы при штамповке.

Водород находится в твердом растворе и скапливается в порах и дислокациях. Хрупкость, обусловленная водородом, проявляется

тем резче, чем выше прочность материала. Наиболее сильное охрупчивание наблюдается в закаленных сталях с мартенситной структурой, а в аустенитных сталях оно отсутствует.

Повышенное содержание водорода приводит к образованию флокенов. Это внутренние надрывы, образующиеся в результате высоких давлений, которые развивает водород, заполняющий поры вследствие понижения растворимости. Флокены в изломе имеют вид белых пятен, а на поверхности — мелких трещин. Этот дефект обычно встречается в крупных поковках хромистых и хромоникелевых сталей. Для его предупреждения заготовки после горячей деформации медленно охлаждают или длительно выдерживают при 250 °С. При этих условиях водород, имеющий большую скорость диффузии, не скапливается в порах, а удаляется из стали.

Случайные примеси — элементы, попадающие в сталь из вторичного сырья или руд. Из скрапа в сталь попадают хром, никель, олово и др. Сталь, выплавленная из уральских руд, содержит медь, из керченских — мышьяк. Случайные примеси оказывают незначительное влияние на свойства стали.

9.3. МАРКИРОВКА СТАЛЕЙ

Углеродистые стали, за исключением сталей обыкновенного качества, маркируются по содержанию углерода.

Углеродистые качественные конструкционные стали маркируют двузначным числом, указывающим среднее содержание углерода в стали в сотых долях процента. Например, сталь 15 содержит в среднем 0,15% С; сталь 40 — в среднем 0,4% С и т.д. Если сталь кипящая, добавляют индекс «кп», полуспокойная — индекс «пс» (например: 08кп, 20пс). Для спокойных сталей индекс не указывают.

Углеродистые качественные инструментальные стали маркируют буквой У и следующей за ней цифрой, указывающей среднее содержание углерода в десятых долях процента. Так, У8 означает, что сталь углеродистая инструментальная качественная, содержит в среднем 0,8% С. Если сталь высококачественная, то справа от цифры ставится буква А, например: У8А.

В легированных сталях содержатся специально вводимые в различных количествах легирующие элементы. Марка легированной стали состоит из сочетания букв и цифр, обозначающих ее химический состав. Принято обозначать: хром — Х, никель — Н, марганец — Г, кремний — С, молибден — В, титан — Т, ванадий — Ф, алюминий — Ю, медь — Д, ниобий — Б, бор — Р, кобальт — К, ред-

коземельные металлы — Ч, фосфор — П, азот — А (если буква А находится в середине марки).

Цифра, стоящая после буквы, указывает примерное содержание легирующего элемента в процентах. Если цифра отсутствует, то легирующего элемента меньше или около 1%. Нестандартные стали обозначают самым различным образом: буквой И — исследовательские, П — пробные. Высоколегированные стали сложного состава иногда обозначают упрощенно: по порядковому номеру разработки и освоения стали на металлургическом заводе. Перед номером ставят индексы ЭИ (Э — завод «Электросталь», И — исследовательская) или ЭП (П — пробная). Например: стали ЭИ481 или 37Х12Н8Г8МФБ; стали ЭП388 или 40Х15Н7ГФ2МС.

В *конструкционных легированных сталях* две цифры в начале марки показывают содержание углерода в сотых долях процента. Например, сталь 20ХН3А в среднем содержит 2% С; 1% Cr; 3% Ni. Буква А в конце марки означает, что сталь высококачественная. Особо высококачественные стали имеют в конце марки букву Ш (например, 30ХГС-Ш).

В *инструментальных сталях* одна цифра в начале марки указывает на содержание углерода в десятых долях процента. При содержании в них 1% С или более начальную цифру опускают. Например, в стали ХВ4 содержится более 1% С; 1% Cr и 4% W.

Допускается не указывать в марках сложнолегированных сталей ряд цифр. Например, для удобочитаемости сталь 38Х2МЮА обозначают как 38ХМЮА.

Некоторые группы сталей содержат дополнительные обозначения: марки шарикоподшипниковых сталей начинаются с буквы Ш, быстрорежущих — с буквы Р, электротехнических — с буквы Э, магнитотвердых — с буквы Е, автоматных — с буквы А.

9.4. УГЛЕРОДИСТЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ СТАЛИ

Около 80% объема производства стали составляют углеродистые. Большой объем производства углеродистых сталей помимо экономических соображений определяется тем, что они сочетают в себе удовлетворительные механические свойства с высокой технологичностью: при одинаковом содержании углерода их обрабатываемость резанием и давлением значительно превосходит легированные стали.

Однако углеродистым сталям свойственны существенные недостатки: высокая критическая скорость закалки и небольшая прока-

ливаемость. Их закаливают в воде, что вызывает значительные деформации и коробления.

Углеродистые конструкционные стали выпускают обыкновенного качества и качественные.

Углеродистые стали обыкновенного качества. В этих сталях допускаются наиболее высокое содержание вредных примесей, а также газонасыщенность и загрязненность неметаллическими включениями.

Стали обыкновенного качества выпускают в виде проката (листов, прутков, балок и т.д.), а в зависимости от назначения и гарантируемых свойств поставляют трех групп: А, Б, В.

Стали маркируют сочетанием букв «Ст» и цифрой (от 0 до 6), обозначающей номер марки. Стали групп Б и В имеют перед маркой буквы Б и В, указывающие на их принадлежность к этим группам. Группа А в обозначении марки стали не указывается. Степень раскисления обозначают добавлением индексов: в спокойных сталях — «сп», полуспокойных — «пс», кипящих — «кп».

Стали группы А поставляют с гарантированными механическими свойствами. Химический состав не регламентируется.

С увеличением номера марки повышается предел прочности и снижается пластичность стали.

Стали группы Б поставляют с гарантированным химическим составом. Механические свойства не гарантируются. Стали этой группы предназначены для изделий, изготовляемых с применением горячей обработки (ковки, сварки и в некоторых случаях — термической обработки), при которой исходная структура и механические свойства не сохраняются. Для таких сталей важны сведения о химическом составе, необходимые для определения режимов горячей обработки.

Стали группы В поставляют с гарантированными механическими свойствами и химическим составом. Их широко применяют для производства сварных конструкций.

Марки сталей этой группы — от ВСт1 до ВСт5.

Углеродистые стали обыкновенного качества (всех трех групп) предназначены для изготовления различных металлоконструкций, а также слабнонагруженных деталей машин и приборов.

Низкоуглеродистые стали применяют для производства строительных конструкций (арматуры, фермы), изготавливаемых сваркой и холодной деформацией, а также крепежных деталей.

Среднеуглеродистые стали, обладающие большой прочностью, предназначены для изготовления рельсов, железнодорожных

колес, а также валов, шкивов, шестерен и других деталей грузоподъемных и сельскохозяйственных машин.

Углеродистые качественные стали характеризуются более низким, чем у сталей обыкновенного качества, содержанием вредных примесей и неметаллических включений. Их поставляют в виде проката, поковок и других полуфабрикатов с гарантированным химическим составом и механическими свойствами. Маркируют двузначными цифрами 05, 08, 10, 15, 20—85, обозначающими среднее содержание углерода в сотых долях процента. Например, сталь 10 содержит в среднем 0,1% С; сталь 45—0,45% С и т.д.

Спокойные стали маркируют без индекса, полуспокойные и кипящие — с индексами, соответственно «пс» и «кп».

Кипящие стали производят марок: 05кп, 08кп, Юкп, 15кп, 20кп.

Полуспокойные стали — 08пс, 10пс, 15пс, 20пс.

Изделия из стали изготавливают без термической обработки, термически обработанными и нагартованными.

Качественные стали находят многообразное применение в машино- и приборостроении, так как в зависимости от содержания углерода и термообработки они обладают широким диапазоном механических и технологических свойств.

Автоматные стали отличаются хорошей обрабатываемостью резанием благодаря повышенному содержанию серы и фосфора и предназначены для изготовления деталей массового производства на станках-автоматах. Маркируют буквой А (автоматная) и цифрами, показывающими среднее содержание углерода в сотых долях процента. Чтобы не проявилась красноломкость, в автоматных сталях увеличено количество марганца.

Сера образует большое количество вытянутых в направлении проката сульфидов марганца, нарушающих сплошность металла и способствующих образованию ломкой «сыпучей» стружки. Фосфор повышает хрупкость феррита, облегчая отделение и измельчение стружки. Он вместе с сульфидами устраняет налипание металла на инструмент и обеспечивает получение гладкой поверхности, что важно для деталей с мелкой резьбой (гаек, винтов) (стали марок А12, А20, А30, А40Г).

Образование мелкой стружки уменьшает нагрев инструмента, способствует увеличению его стойкости и скорости резания. Сера и фосфор, улучшая обрабатываемость резанием, ухудшают качество стали.

Автоматные стали имеют пониженные вязкость, пластичность в поперечном направлении, усталостную прочность и коррозионную

стойкость. Их используют для изготовления крепежных и мелких слабонагруженных деталей машин и приборов.

9.5. УГЛЕРОДИСТЫЕ СТАЛИ ДЛЯ ФАСОННОГО ЛИТЬЯ

Стальное фасонное литье широко используется для изготовления деталей оборудования и аппаратов нефтехимических и нефтеперерабатывающих заводов, а также печного оборудования термических крекинг, фитингов, задвижек, предохранительных редукционных клапанов, дросселирующей и запорной арматуры, изделий машиностроительной продукции.

По качественным показателям отливки из углеродистой стали делят на три группы: I — отливки нормального качества; II — отливки повышенного качества; III — отливки особого качества.

Разница между этими группами заключается в способах выплавки стали и содержании вредных примесей.

Для исправления литой структуры, устранения ликвационной неоднородности и уменьшения остаточных напряжений стальные отливки подвергают термообработке (отжигу, нормализации, закалке, отпуску).

Закалку с отпуском применяют при изготовлении ответственных деталей, это дает наилучшее сочетание механических свойств. Отливки из углеродистой стали несложной формы обычно закалывают в воде. Для предотвращения образования трещин отливки необходимо сразу после закалки подвергать отпуску при 600–650 °С.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как влияют примеси в сталях на их свойства?
2. Каковы принципы классификации сталей?
3. Что понимают под качеством сталей?
4. Какой элемент в наибольшей степени и как оказывает влияние на свойства сталей?
5. Назовите принципы маркировки углеродистых сталей.
6. Приведите примеры применения углеродистых сталей.

Глава 10

ЛЕГИРОВАННЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ СТАЛИ

10.1. ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Легированные стали (ЛС) обладают лучшими механическими свойствами после термообработки (закалки и отпуска). Особенно значительно повышаются предел текучести и ударная вязкость. Это объясняется тем, что легированные стали обладают меньшей критической скоростью закалки, а следовательно, лучшей прокаливаемостью. Кроме того, после термообработки они имеют более мелкое зерно и более дисперсные структуры. Замена углеродистой стали легированной из-за большей прокаливаемости последней позволяет проводить закалку деталей в менее резких охладителях (масло, воздух), что уменьшает деформацию изделий и опасность образования трещин. Поэтому ЛС применяют для изготовления не только крупных изделий, но и изделий небольшого сечения, имеющих сложную форму. Чем выше в стали концентрация легирующих элементов, тем выше ее прокаливаемость. Улучшение механических свойств обусловлено влиянием легирующих элементов на свойства феррита, дисперсность карбидной фазы, устойчивость мартенсита при отпуске, размер зерна.

К важнейшим факторам, способствующим повышению конструкционной прочности, относятся снижение при легировании критической скорости закалки и увеличение прокаливаемости. Наиболее эффективно повышает прокаливаемость введение элементов (Cr + Mo), (Cr + Ni), (Cr + Ni + Mo).

Большинство легирующих элементов измельчают зерно, что способствует повышению работы развития трещины и снижению порога хладноломкости.

Для обеспечения высокой конструкционной прочности количество легирующих элементов в стали должно быть оптимальным. После достижения необходимой прокаливаемости избыточное легирование снижает запас вязкости и облегчает хрупкое разрушение.

Хром повышает твердость и прочность, сохраняет вязкость, увеличивает сопротивляемость стали коррозии. Вводят до 2%. Он растворяется в феррите и цементите, оказывая благоприятное влияние на механические свойства стали.

Никель повышает прочность, ударную вязкость, коррозионную стойкость, прокаливаемость стали. Наиболее ценный и в то же время дефицитный легирующий элемент. Вводят от 1 до 5%.

Марганец — дешевый легирующий элемент; растворяясь в феррите, повышает прочностные свойства стали, уменьшает склонность к хладноломкости. Вводят до 1,5%. Он заметно повышает предел текучести стали, однако такая сталь чувствительна к перегреву, поэтому для измельчения зерна вместе с ним вводят карбидообразующие элементы.

Кремний — дешевый некарбидообразующий элемент, количество которого ограничивают 2%. Сильно повышает предел текучести, несколько затрудняет разупрочнение стали при отпуске, снижает вязкость и повышает порог хладноломкости при содержании свыше 1%.

Молибден повышает упругость, прочность, красностойкость, коррозионную стойкость, окалиностойкость стали. Дорогой дефицитный карбидообразующий элемент, который растворяется в цементите. Основная цель введения 0,2–0,4% Мо — уменьшение вероятности к отпускной хрупкости II рода, улучшение свойств легированных сталей за счет измельчения зерна, повышение стойкости к отпуску, увеличение прокаливаемости.

Вольфрам образует очень твердые карбиды, резко увеличивающие твердость и красностойкость стали. Вводят в количестве 0,8–1,2%. Влияние — как у молибдена.

Ванадий увеличивает плотность стали, измельчает зерно и повышает твердость и прочность. Сильный карбидообразователь. Вводят до 0,3%. Повышение содержания недопустимо (так же как молибдена и вольфрама), так как приводит к образованию специальных трудно растворимых при нагреве карбидов. Избыточные карбиды снижают прокаливаемость и, располагаясь по зернам, способствуют хрупкому разрушению.

Бор вводят в микродозах (0,002–0,005%) для увеличения прокаливаемости. Микролегирование бором эквивалентно 1% Ni; 0,5% Cr; 0,2% Мо.

Кобальт увеличивает ударную вязкость, жаропрочность и магнитные свойства.

Медь усиливает антикоррозионные свойства стали.

Титан увеличивает прочность стали, повышает обрабатываемость и сопротивление коррозии (так же как ванадий).

Ниобий повышает сопротивление коррозии.

Алюминий повышает жаростойкость (совместно с кремнием улучшает коррозионную стойкость).

Цирконий позволяет получать мелкозернистую сталь.

Легирующие элементы активно влияют на фазовые превращения в сталях при нагревании и охлаждении, поэтому воздействуют на структуру и свойства сталей после различной термической обработки. В сталях с небольшим и средним содержанием углерода (до 0,6%) во многих структурных состояниях имеется большое количество феррита. Поэтому свойства стали существенно зависят от свойств феррита. Прочность и твердость феррита повышаются в большей степени при увеличении содержания в нем марганца и кремния и в меньшей степени — никеля. Наиболее слабо на твердость феррита влияют Mo, W и Cr.

10.2. УЛУЧШАЕМЫЕ И ВЫСОКОПРОЧНЫЕ ЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ

Улучшению, закалке и высокому отпуску (500–600 °C) на структуру «сорбит» подвергают стали, содержащие 0,3–0,5% C и не более 5% легирующих элементов.

Улучшаемые стали предназначены для изготовления ответственных деталей машин (валов, штоков, шатунов), работающих в условиях циклических и ударных нагрузок, концентрации напряжений, а в некоторых случаях при пониженных температурах. Поэтому они должны иметь высокий предел текучести в сочетании с высокой пластичностью, вязкостью, малой чувствительностью к надрезу. Важное значение для этих сталей имеют порог хладноломкости, предел выносливости и другие параметры конструктивной прочности.

Высокий комплекс механических свойств возможен только при сквозной прокаливаемости, поэтому она служит важнейшей характеристикой этих сталей. Кроме прокаливаемости важно обеспечить в сталях мелкое зерно и не допустить развития отпускной хрупкости.

Стали с пределом прочности 140–200 кгс/мм² и более называют *высокопрочными*. Эти стали отличаются повышенной чувствительностью к нагрузкам и склонностью к хрупкому разрушению. Для обеспечения надежной работы и использования высокой прочности такие стали должны иметь достаточный запас пластичности и вязкости. Необходимо избегать конструктивных концентраторов напряжений.

Высокопрочное состояние в сочетании с высоким сопротивлением хрупкому разрушению может быть получено при использовании:

- среднеуглеродистых комплекснолегированных сталей после низкого отпуска при ТМО;
- мартенситностареющих сталей.

Среднеуглеродистые комплекснолегированные низкоотпущенные стали. После закалки и низкого отпуска уровень прочности стали определяется содержанием углерода и практически не зависит от присутствия легирующих элементов. Увеличение от 0,2 до 0,6% С повышает предел прочности со 120 до 280 кгс/мм², при этом сопротивление хрупкому разрушению уменьшается. В связи с этим содержание углерода ограничивают 0,35–0,4%, а предел прочности — 180–200 кг/мм².

Снижение чувствительности к подрезам достигается легированием никелем в сочетании с другими элементами.

К распространенным высокопрочным сталям относятся стали 30ХГСНА, 40ХГСНЗВА, 30Х2ГСНЗВМ. Они применяются в самолетостроении для изготовления силовых сварных конструкций деталей фюзеляжей, шасси. Для достижения предела прочности 165 кгс/мм² стали подвергают изотермической закалке, поскольку по сравнению с низкоотпущенным состоянием она обеспечивает меньшую чувствительность к надрезам и более высокое сопротивление разрушению.

Si, Mo, W, V вводят в связи с тем, что эти элементы затрудняют разупрочнение при отпуске, позволяют несколько снизить содержание углерода.

ТМО применительно к среднеуглеродистым легированным сталям 30ХГСА, 40ХН, 40ХНМА, 38ХНЗМА и других марок обеспечивает высокую прочность ($\sigma_{\text{в}} = 200\text{--}280$ кгс/мм²) при достаточном запасе пластичности и вязкости. Повышение прочности при ТМО связано с тем, что деформация вызывает в аустените измельчение блоков, создает высокую плотность дислокаций, образующих устойчивую ячеистую структуру, которая наследуется при мартенситной закалке.

Мартенситностареющие стали. Это класс высокопрочных материалов, превосходящих по конструктивной прочности и технологичности рассмотренные выше среднеуглеродистые стали.

Их основа — безуглеродистые (0,03% С) сплавы железа с 8–25% Ni, легированные Co, Mo, Ti, Al, Cr и другими элементами.

Высокая прочность таких сталей достигается совмещением двух механизмов упрочнения — мартенситного превращения и старения мартенсита. Небольшой вклад вносит также легирование твердого раствора.

Никель стабилизирует γ -твердый раствор, существенно снижая температуру $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения, которое даже при невысоких скоростях охлаждения протекает по мартенситному механизму.

Мартенситностареющие стали закаливают при 800–860 °С на воздухе.

Основное упрочнение достигается при старении при 450–500 °С, когда из мартенсита выделяются мелкодисперсные частицы вторичных фаз (Ni_3Ti , NiAl , Fe_2Mo и др.), связанные с матрицей.

Для мартенситностареющих сталей характерны высокий предел текучести и низкий порог хладноломкости. Другим важным свойством сталей этого класса является высокая технологичность. Они обладают неограниченной прокаливаемостью, хорошо свариваются, до старения легко деформируются и обрабатываются резанием. При термообработке практически не происходит коробления и исключено обезуглероживание. Стали мартенситностареющего класса, несмотря на высокую стоимость, находят все более широкое применение. Их используют для изготовления наиболее ответственных деталей в авиации, ракетной технике, судостроении, приборостроении.

10.3. РЕССОРНО-ПРУЖИННЫЕ ЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ

Рессорно-пружинные легированные стали предназначены для изготовления упругих элементов общего назначения. Особенности работы пружин, рессор и других деталей пружинного типа состоят в том, что при значительных нагрузках в них не допускается остаточная деформация. В связи с этим стали должны обладать высоким сопротивлением малым пластическим деформациям, а также высоким пределом выносливости. Этим требованиям удовлетворяют стали с повышенным содержанием углерода (0,5–0,7% С), которые подвергают закалке и среднему отпуску (420–520 °С) на троостит.

Небольшие пружины простой формы изготавливают из стали, поставляемой в термически обработанном состоянии. Для крупных пружин, требующих больших усилий при навивке, сталь используют в отожженном состоянии. Термообработке подвергают готовые изделия, полученные горячей навивкой.

Все легированные рессорно-пружинные стали относятся к перлитному классу. Основными легирующими элементами в них являются Si и Mn, а в сталях более ответственного назначения — Cr, V, Ni. Легирование (кроме Si, Mn) мало влияет на предел упругости — главное свойство этих сталей. Более существенно оно проявляется

в повышении релаксационной стойкости, прокаливаемости, предела выносливости. Релаксация опасна тем, что в результате перехода части упругой деформации в пластическую упругие элементы после разгрузки изменяют размеры и форму. Например, долгое время сжатая пружина или лист рессоры при снятии нагрузки полностью не распрямляются и теряют упругие и эксплуатационные свойства. Легированные стали, имея повышенную релаксационную стойкость, обеспечивают более длительную и надежную работу машин и приборов.

10.4. КОНСТРУКЦИОННЫЕ (СТРОИТЕЛЬНЫЕ) НИЗКОЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ

Низколегированными называются стали, содержащие не более 0,22% С и сравнительно небольшое количество недефицитных легирующих элементов: Мп (до 1,8%), Si (до 1,2%), Cr (до 0,8%), а также Ni (до 0,8%), Cu (до 0,5%), V (до 0,15%), Ti (до 0,3%) и др. Эти стали в виде листов и сортового проката применяют в строительстве и машиностроении для сварных конструкций, в основном без дополнительной термообработки.

Низколегированные стали с малым содержанием углерода хорошо свариваются. Эти стали по сравнению с углеродистыми сталями обыкновенного качества (Ст2, Ст3, Ст4) имеют более высокие значения пределов прочности и текучести при сохранении хорошей пластичности, меньшей склонности к старению и хладноломкости. Применение низколегированных сталей, имеющих $\sigma_{0,2} = 35 \text{ кгс/мм}^2$, взамен углеродистых позволяет сэкономить до 15% металла, а при $\sigma_{0,2} = 40 \text{ кгс/мм}^2$ экономия достигает 25–30%.

Никель понижает порог хладноломкости. Это важно учитывать для строительных сталей, для которых при температуре 40 °С ударная вязкость должна быть 3–5 кгс·м/см².

Введение меди, никеля или одновременно меди и фосфора увеличивает коррозионную стойкость сталей в атмосферных условиях (стали 10ХСНД, 15ХСНД).

Низколегированные стали нередко поставляют после нормализации или нормализации и высокого отпуска. Нормализация несколько повышает предел прочности и текучести, измельчая зерно, улучшает пластичность и вязкость, уменьшая склонность к хрупкому разрушению. Некоторые стали (14Г2, 17ГС, 15ХСНД) поступают после закалки и отпуска, что значительно повышает их прочность, понижает порог хладноломкости и склонность к старению. Приме-

нение в строительстве термически обработанных профилей и листов из низколегированной стали, имеющей $\sigma_{0,2} = 40\text{--}50 \text{ кгс/мм}^2$, дает экономию металла до 50%.

Выбор стали для строительных конструкций осуществляется исходя из вида сооружения, условий эксплуатации, расчетных температур, характера и величины действующих нагрузок.

Арматурные стали. Низколегированные горячекатаные стали применяют и для армирования обычных и предварительно напряженных железобетонных конструкций (стержневая арматурная сталь).

10.5. ШАРИКОПОДШИПНИКОВЫЕ СТАЛИ

Рабочие поверхности деталей подшипников качения (кольца, ролики, шарики) испытывают большое количество циклов высоких контактных напряжений, а вследствие проскальзывания происходит значительное местное истирание. Поэтому к сталям для подшипников качения предъявляются требования максимального сопротивления контактной усталости и истиранию.

Шарикоподшипниковая сталь прежде всего должна обладать высокой твердостью, поэтому используют высокоуглеродистые стали типа инструментальной (иногда низкоуглеродистые в цементованном состоянии). Они содержат около 1% углерода. Для увеличения прокаливаемости их легируют хромом — 0,6–1,5% Cr (ШХ6, ШХ9, ШХ15), а иногда дополнительно — кремнием и марганцем (ШХ20ГС). Количество легирующих элементов определяется размером детали. Так, сталь ШХ6 применяют для деталей диаметром не более 10 мм, а ШХ20ГС — выше 30 мм. К таким сталям предъявляют высокие требования по содержанию неметаллических включений, так как они вызывают преждевременное усталостное разрушение. Недопустима также карбидная неоднородность. Электрошлаковый и вакуумно-дуговой переплав, уменьшая количество неметаллических включений (сульфидов, оксидов и др.), повышает долговечность подшипников. В этом случае к марке стали добавляют букву Ш, а вакуумно-дуговой переплав обозначают добавлением к марке букв ВД, например: ШХ15Ш, ШХ15ВД.

Термическая обработка шарикоподшипниковых сталей с небольшим количеством хрома состоит из закалки и низкого отпуска (до 200 °С), после чего получается твердость HRC = 60–66. Структура должна представлять собой отпущенный очень мелкий игольчатый мартенсит.

10.6. ИЗНОСОСТОЙКИЕ СТАЛИ

Износ деталей машин и аппаратов является сложным процессом. Типичными случаями являются обычное трение скольжения и абразивный износ. В первом случае металл наклепывают с поверхности. Во втором случае, когда частицы металла вырываются с поверхности, износостойкость определяется твердостью и сопротивлением отрыву. Износостойкость может быть повышена химико-термической обработкой.

Графитизированная сталь. Для получения графитизированной стали используют высокоуглеродистую сталь (1,5–2% С) с повышенным содержанием кремния (1–2%). Последний способствует графитизации цементита. Часть углерода в этих сталях после графитизирующего отжига выделяется в виде графита. После термообработки структура стали состоит из зернистого перлита с некоторым количеством мелких округлых включений графита. При неабразивном износе графит играет роль смазки, предотвращая сухое трение и схватывание. Кроме того, эти стали обладают антивибрационными свойствами.

Графитизирующую сталь с высокой твердостью HRC = 63 после закалки применяют для изготовления штампов, матриц, коленчатых валов, шаров, лопастей дробеструйных аппаратов.

Аустенитная высокомарганцовистая сталь. Наклеп металла значительно увеличивает твердость, но не повышает износостойкость стали. Исключением служит высокомарганцовистая сталь с содержанием углерода порядка 1,2% (Г13Л), которая после наклепа обладает высокой износостойкостью. Буква Л означает, что сталь литая. Характерной особенностью марганцовистого аустенита является его повышенная склонность к наклепу.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие легирующие элементы способствуют повышению прокаливаемости сталей?
2. Назовите основные легирующие элементы в сталях. Каков характер влияния каждого из них на свойства сталей?
3. За счет каких мер получают высокопрочные легированные стали?
4. Какими эксплуатационными свойствами должны обладать пружинные и шарикоподшипниковые стали?
5. Какова особенность структуры износостойких сталей?

Глава 11

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СТАЛИ И СПЛАВЫ

Инструментальные стали предназначены для изготовления режущего инструмента и штампов холодного и горячего деформирования. Для обеспечения износостойкости инструментальным сталям должны быть присущи высокая твердость и высокая прочность при удовлетворительной вязкости.

К важному свойству инструментальных сталей, подвергающихся при резании или деформировании существенному нагреву, относится теплостойкость (красностойкость).

Кроме служебных свойств для инструментальных сталей большое значение имеют технологические свойства: прокаливаемость; малые объемные изменения при закалке; обрабатываемость резанием, давлением; шлифуемость.

В промышленности применяют большое число инструментальных углеродистых и легированных сталей. Особую группу образуют твердые сплавы, обладающие высокой износостойкостью.

11.1. УГЛЕРОДИСТЫЕ И ЛЕГИРОВАННЫЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СТАЛИ

Углеродистые инструментальные стали поставляют после отжига на зернистый перлит с гарантией на химический состав и твердость. Их производят качественными (У7, У8, У9—У13) и высококачественными (У7А, У8А, У9А—У13А). Буква У в марке показывает, что сталь углеродистая, а цифра — среднее содержание углерода в *десятих* долях процента. Благодаря невысокой твердости в состоянии поставки (НВ = 187—217) углеродистые стали хорошо обрабатываются резанием и деформируются, что позволяет применять накатку, напеску и другие методы изготовления инструмента.

Из-за низкой прокаливаемости (10—12 мм) углеродистые стали применяют для изготовления мелкого инструмента и инструмента сечением до 25 мм с незакаленной серединой (метчики, развертки, напильники и др.). Несквозная закалка уменьшает деформацию инструмента и повышает (за счет вязкой сердцевины) его устойчивость к ударам и вибрациям.

Высококачественные стали имеют те же значения, что и качественные, но из-за несколько лучшей вязкости их чаще используют для изготовления инструментов с более тонкой режущей кромкой.

Недостатки углеродистых сталей — чувствительность к перегреву и отсутствие теплостойкости. Наиболее склонны к перегреву стали марок У8, У9, что существенно ограничивает их применение.

Инструмент из углеродистых сталей отпускается и теряет твердость при нагреве свыше 200 °С. В связи с этим он пригоден для обработки сравнительно мягких материалов и при небольших скоростях резания.

Легирующие элементы добавляют в стали в количестве до 5% для увеличения закаливаемости, прокаливаемости, уменьшения деформирования и опасности растрескивания инструмента.

Хром — постоянный легирующий элемент низколегированных сталей.

Марганец (1–2%) добавляют для обеспечения минимального изменения размеров при закалке.

Кремний (1–1,5%) добавляют для повышения сопротивления отпуску и образования легко отделяющейся окалины.

Вольфрам (1–1,5%) добавляют для повышения износостойкости.

Никель (до 1,5%) добавляют в штамповые стали для увеличения вязкости.

Для обеспечения теплостойкости вводят хром, вольфрам, молибден в большом количестве, с тем чтобы связать углерод в карбиды.

Кобальт увеличивает теплостойкость, снижает количество карбидов в стали и увеличивает их дисперсность.

Основные требования к режущим инструментам — износостойкость и теплостойкость. Условия работы инструмента зависят от режимов резания и свойств обрабатываемого материала. Чем больше скорость резания, сечение стружки, а также прочность и вязкость обрабатываемого материала, тем выше температура инструмента. При этих условиях работоспособность инструмента определяется способностью материала сохранять ее при длительном нагреве.

По *теплостойкости* материалы подразделяют на следующие группы:

- низколегированные стали, не обладающие теплостойкостью;
- высоколегированные быстрорежущие стали с теплостойкостью до 600–640 °С;
- твердые сплавы с теплостойкостью до 800–1000 °С.

Низколегированные стали содержат повышенное количество углерода (0,9–1,4%) и до 5% легирующих элементов и обладают повышенной прокаливаемостью. Это заэвтектоидные стали перлитного

класса. Их подвергают неполной закалке и низкому отпуску ($HRC = 62-69$). Характеризуются высокой износостойкостью, однако не обладают теплостойкостью. Их применяют для изготовления инструмента, работающего при небольших скоростях резания и допустимой температуре нагрева $200-260\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В марках инструментальных легированных сталей содержание C указывается в *десятых* долях процента (например, марка 9ХС означает: 0,9% C ; 1% Cr ; 1,4% Si). Если $C > 1\%$, то цифры не указывают: ХВГ, ХГ. В отличие от углеродистых они менее склонны к перегреву и позволяют изготавливать инструмент больших размеров и более сложной формы.

Сталь ХВ4 отличается особо высокой твердостью и износостойкостью ($HRC = 67-69$) вследствие образования карбида вольфрама. Ее называют алмазной; применяют для чистовой обработки твердых материалов.

Стали марок 9ХС, ХВГ, ХВСГ закаляют в масле; относятся к сталям с глубокой прокаливаемостью. Сталь 9ХС благодаря присутствию кремния имеет более высокую устойчивость против отпуска (до $260\text{ }^{\circ}\text{C}$), повышенные режущие свойства; применяют для изготовления фрез, сверл, резьбонарезного и другого инструмента сечением до 35 мм. Недостаток стали 9ХС — склонность к обезуглероживанию.

Сталь ХВГ из-за присутствия марганца характеризуется мягкой деформацией при закалке; применяют для изготовления длинного стержневого инструмента (сверл, разверток, протяжек и др.) сечением до 45 мм.

Сталь ХВСГ — сложнолегированная сталь, сочетает лучшие свойства сталей ХВГ, 9ХС; используют для изготовления инструмента большого сечения (до 100 мм).

11.2. БЫСТРОРЕЖУЩИЕ СТАЛИ

Быстрорежущие стали — группа высоколегированных сталей, предназначенных для изготовления высокопроизводительного инструмента.

Основное свойство этих сталей — высокая теплостойкость, которая обеспечивается введением большого количества вольфрама совместно с другими карбидообразующими (Mo , V), а также кобальтом.

Эта сталь сохраняет твердость до $600-640\text{ }^{\circ}\text{C}$ и допускает в 3–5 раз более производительные режимы резания, чем стали, не обладающие теплостойкостью.

В маркировке быстрорежущие стали обозначают буквой Р, цифра после которой указывает содержание вольфрама — основного легирующего элемента — в процентах. Содержание ванадия до 2% и хрома до 4% во всех сталях в марках не указывают. Стали, содержащие дополнительно молибден, кобальт и повышенный процент ванадия, имеют в марке соответственно буквы М, К, Ф и цифры, показывающие их количество (Р6М5, Р10К5Ф5).

Высокие свойства инструмент из быстрорежущей стали приобретает после закалки и трехкратного отпуска. Из-за низкой теплопроводности быстрорежущие стали при закалке нагревают медленно с прогревами при 450–850 °С, при этом применяют соляные ванны для уменьшения окисления и обезуглероживания. Особенность закалки быстрорежущих сталей — высокая температура нагрева. Она необходима для обеспечения теплостойкости, получения после закалки высоколегированного мартенсита. Быстрорежущие стали по структуре нормализации относят к мартенситному классу. С температуры закалки мелкий инструмент охлаждают на воздухе, крупный — в масле. Сложный инструмент для уменьшения деформаций подвергают ступенчатой закалке с выдержкой в горячих средах при 500–550 °С.

После закалки стали не обладают максимальной твердостью (HRC = 60–62), так как в структуре кроме мартенсита и первичных карбидов содержится 30–40% остаточного аустенита, присутствие которого вызвано снижением M_s ниже 0 °С. Остаточный аустенит превращают в мартенсит при отпуске или обработке холодом.

Быстрорежущие стали — «вторично твердеющие». Наибольшая твердость достигается после отпуска при 550–570 °С. В процессе выдержки при отпуске из мартенсита и остаточного аустенита выделяются дисперсные карбиды M_6C , которые при последующем охлаждении превращаются в мартенсит. Для быстрорежущих сталей применяют три, а для некоторых марок — четыре отпуска, например для сталей марок Р14Ф4, Р9Ф5.

В термообработанном состоянии быстрорежущие стали имеют и структуру мартенсита отпуска с наличием карбидов.

По режущим свойствам быстрорежущие стали делят на две группы: нормальной и повышенной производительности.

Группу нормальной производительности образуют вольфрамовые (Р18, Р12, Р9, Р9Ф5) и вольфрамо-молибденовые (Р6М3, Р6М5) стали, сохраняющие твердость не ниже HRC = 58 до 650 °С. Из-за одинаковой теплостойкости эти стали имеют близкие режущие

свойства и отличаются главным образом механическими и технологическими свойствами.

К *группе сталей повышенной производительности* относятся стали, содержащие кобальт или повышенное количество ванадия: P18Ф2, P14Ф4, P6M5K5, P9M4K8, P9K5, P9K10, P10K5Ф5, P18K5Ф2. Они превосходят стали первой группы по теплостойкости (630–640 °С), твердости (HRC > 64) и износостойкости, но уступают им по прочности и пластичности. Стали повышенной производительности применяют для обработки высокопрочных сталей, коррозионноустойчивых и жаропрочных сталей с аустенитной структурой.

В структуре закаленной стали имеется некоторое количество сравнительно мягкого остаточного аустенита, что обусловлено ее химическим составом и режимом термообработки. В результате этого понижаются твердость и прочность, ухудшаются теплопроводность и магнитные свойства, изменяются размеры, ухудшается качество поверхности изделия. Для уменьшения количества остаточного аустенита используют криогенный метод обработки (глубокое охлаждение). В результате улучшаются механические свойства, повышаются твердость и износостойкость.

11.3. ШТАМПОВЫЕ СТАЛИ

Для обработки металлов давлением применяют инструменты — штампы, пуансоны, ролики, валики и т.д., деформирующие металл. Стали, применяемые для изготовления такого рода инструмента, называют *штамповыми сталями*.

Штамповые стали делятся на две группы: *деформирующие металл в холодном и горячем состояниях*. Условия работы стали при различных видах штамповки сильно различаются между собой.

Стали для штампов холодного деформирования. Стали для штампов и другого разнообразного инструмента холодной обработки давлением должны обладать высокой динамической прочностью, твердостью, износостойкостью. Для больших скоростей деформирования, вызывающих разогрев рабочей кромки инструмента до 450 °С, сталям должна быть присуща достаточная теплостойкость. Для штампов со сложной конфигурацией важно обеспечить минимальные объемные изменения при закалке.

В связи с разнообразием условий деформирования, форм и размеров штампов применяют различные стали.

Низколегированные стали повышенной износостойкости, так же как и углеродистые У10, У11, У12, используют преимущественно для

вытяжных и высадочных штампов, которые из-за несковозной прокаливаемости имеют твердый износостойкий слой и вязкую сердцевину, позволяющую работать при небольших ударных нагрузках.

Вытяжные штампы, подвергающиеся интенсивному износу без динамических нагрузок, после неполной закалки отпускают при 150 °С на твердость HRC = 58–61. Высадочные штампы и пуансоны, работающие с ударными нагрузками, подвергают отпуску при 275–325 °С на твердость рабочей части HRC = 54–56.

Высокохромистые стали X12, X12M, X12Ф1 обладают высокой износостойкостью, глубокой прокаливаемостью (150–200 мм и более). Они относятся к ледебуритному классу и содержат 16–17% карбидов (Cr, Fe)₇C₃. Стали обладают высокой износостойкостью и при закалке в масле мало деформируются, что важно для штампов сложной формы. Молибден и ванадий способствуют сохранению мелкого зерна. Недостаток высокохромистых сталей заключается в трудности обработки резанием в отожженном состоянии (HB = 207–270) и снижении механических свойств в случае резко выраженной карбидной неоднородности, вызывающей снижение прочности и вязкости. Наиболее заметно этот недостаток выражен у стали X12. По этой причине чаще применяют стали X12M и X12Ф1. Эти стали обрабатывают как на первичную, так и на вторичную твердость. На первичную твердость их закалывают с более низких температур (1020–1075 °С) и подвергают низкому отпуску (150–170 °С), сохраняющему высокую твердость (HRC = 61–63). Такой режим обеспечивает наибольшую прочность ($\sigma_{изб} = 240\text{--}280$ кгс/мм) при низкой теплостойкости и применяется для большинства штампов и накатных роликов.

Закалку на вторичную твердость применяют для обеспечения теплостойких производств с более высоких температур (1100–1700 °С). Она приводит к пониженной твердости (HRC = 48–54) вследствие сохранения большого количества остаточного аустенита (50–80%). Твердость до HRC = 60–62 повышают 4–6-кратным отпуском при 500–800 °С в результате превращения остаточного аустенита и выделения дисперсных карбидов хрома. При обработке сталей на вторичную твердость теплостойкость увеличивается до 500 °С. Однако вследствие укрупнения зерна при закалке снижаются прочность и вязкость. В связи с этим применение такой обработки ограничено. В основном ее применяют для штампов, работающих при повышенном нагреве больших нагрузок.

Меньшей карбидной неоднородностью обладает *сталь X6ВФ*, которую используют для инструментов с высокой механической прочностью и сопротивлением изнашиванию: накатные площадки, накат-

ники для холодного накатывания зубчатых колес. При закалке она более склонна к росту зерна, поэтому обрабатывается только на первичную твердость.

Хромокремнистые стали 4ХС, 6ХС и стали, дополнительно легированные вольфрамом, — 4ХВ2С, 5ХВ2С, 6ХВ2С, образуют группу сталей повышенной вязкости для ударного инструмента (зубила, гибочные штампы, обжимные матрицы). Повышение вязкости сталей достигается снижением содержания углерода (до 0,4–0,6%) и увеличением температуры отпуска. Стали 4ХС и 6ХС отпускают ниже температуры проявления отпускной хрупкости I рода при 240–270 °С на твердость HRC = 52–55. Стали с вольфрамом, которые не чувствительны к отпускной хрупкости II рода, подвергают отпуску в более широком интервале температур: при 200–250 °С (HRC = 53–58) или при 430–470 °С (HRC = 45–50). Эти стали в результате сохранения более мелкого зерна имеют несколько большую вязкость и предназначены для инструментов, работающих с повышенными нагрузками.

Стали для штампов горячего деформирования. К инструменту, деформирующему металл в горячем состоянии, относятся штампы кузнечного производства, которые деформируют металл, предварительно нагретый до высоких температур (1000–1500 °С). В процессе работы штампы подвергают воздействию сложных напряжений (сжатию, растяжению, изгибу) и истирающему действию горячего металла. Кроме того, при пластической деформации рабочая часть штампа значительно нагревается. При достаточной прочности, износостойкости, вязкости и прокаливаемости эти стали должны обладать также теплостойкостью, окалиностойкостью и разгаростойкостью. Под *разгаростойкостью* понимают устойчивость к образованию сетки поверхностных трещин, вызываемых объемными изменениями в поверхностном слое при резкой смене температур. Это свойство обеспечивается снижением содержания углерода в стали для повышения пластичности, вязкости, а также теплопроводности, уменьшающей разогрев поверхностного слоя и термические напряжения в нем.

В соответствии с особыми требованиями для штампов горячей обработки давлением применяют легированные стали с содержанием углерода 0,3–0,6%, которые после закалки подвергают отпуску при 550–680 °С на троостит или троостосорбит.

Стали для молотовых штампов. Молотовые штампы имеют большие размеры и работают с ударными нагрузками при относительно невысоком нагреве поверхности (400–500 °С). Для изготов-

ления этих штампов применяют низколегированные стали высокой прокаливаемости с повышенной ударной вязкостью и окалиноустойчивостью. Из легирующих элементов они содержат молибден и вольфрам, необходимые, как и в конструкционных сталях, для предупреждения развития отпускной хрупкости, которую в больших сечениях нельзя устранить быстрым охлаждением.

Сталь 5ХНМ — лучшая в этой группе. Из-за высокой прокаливаемости (400 мм) ее применяют для изготовления крупных штампов. После закалки и отпуска сталь сохраняет высокие механические свойства до 500 °С.

Стали 5ХГМ и 5ХНСВ при одинаковой со сталью 5ХНМ прокаливаемостью уступают ей в вязкости из-за замены никеля марганцем или увеличения содержания хрома и кремния. Они предназначены для изготовления средних штампов со стороной 300–400 мм и для крупных (сталь 5ХИСВ) простой формы.

Стали для штампов горизонтально-ковочных машин и прессов. Штампы горячей высадки, протяжки и прессования испытывают в работе высокие давления без больших ударных нагрузок, имеют меньшие размеры, чем молотовые штампы, но нагреваются до более высоких температур. Для сталей этого назначения наиболее важные свойства — теплостойкость и размеростойкость. В случае особо тяжелых условий работы применяют комплексно-легированные стали, которые по составу и структурным превращениям при термообработке сходны с быстрорежущими сталями. Для обеспечения теплостойкости их закаливают с высоких температур и подвергают отпуску, как и быстрорежущие стали, что вызывает дисперсионное твердение и вторичную твердость. Для повышения вязкости закалку проводят при более высоких температурах на троостит, обеспечивая твердость HRC = 45–50.

К сталям подобного назначения относятся следующие.

Стали 3Х2В8Ф, 3Х2В8 с высоким содержанием вольфрама. Они характеризуются повышенной теплостойкостью, сохраняя твердость HRC > 45 и предел текучести $\sigma_{0,2} = 100$ кгс/мм² до температур 650–670 °С. Эти стали предназначены для изготовления тяжелонагруженного инструмента, работающего с разогревом поверхности до 700 °С.

Стали 4Х5В2ФС, 4Х5В4ФСН, 4Х3В2ФМ2 и другие с небольшими добавками вольфрама (молибдена) отличаются повышенной теплостойкостью благодаря более высокой вязкости. Они теплостойки до 600 °С. Присутствие 4–5% хрома придает им хорошую окалиноустойчивость и повышенную износостойкость при нагреве. Эти стали предназначены для изготовления инструмента с высокой устойчи-

востью к резкой смене температур, в частности инструмента высокоскоростной штамповки.

Неheatлостойкие стали 7X3 и 8X3 повышенной вязкости применяют для изготовления инструмента (пуансонов, матриц) из углеродистых и низколегированных сталей на горизонтально-ковочных машинах. Стали прокаливают в сечениях до 70–80 мм. Повышенную вязкость и твердость (HRC = 40–50) получают благодаря проведению отпуска при 480–520 °С, что выше температур развития хрупкости.

Кроме изготовления штампов рассмотренные стали используют для производства пресс-форм литья под давлением, работающих в тяжелых условиях, связанных с периодическим нагревом и охлаждением поверхности и воздействием расплавленного металла. Для отливки медных сплавов ($T_{пл} = 1000\text{ °С}$) применяют стали повышенной теплостойкости; алюминиевые и магниевые сплавы ($T_{пл} = 500\text{--}650\text{ °С}$); стали повышенной размеростойкости. В последнее время для этой цели применяют также мартенситностареющие стали.

Для пресс-форм, менее нагруженных в тепловом отношении, используют стали 4XB2C, X12, 7X3, 8X3, коррозионностойкую сталь 30X13, конструкционные стали 40X, 30XГС. Для повышения стойкости пресс-формы, так же как и штампы, подвергают азотированию, цианированию, борированию и хромированию.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите требования к свойствам инструментальных сталей и сплавов.
2. Сопоставьте свойства углеродистых и легированных инструментальных сталей.
3. Какие элементы являются легирующими для быстрорежущей стали?
4. Сформулируйте требования к сталям для изготовления измерительного инструмента и штампов.

Глава 12

КОНСТРУКЦИОННЫЕ ЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ И СПЛАВЫ С ОСОБЫМИ СВОЙСТВАМИ

К сталям и сплавам с особыми физическими свойствами относятся стали, обладающие каким-нибудь резко выраженным свойством: нержавеющие, жаропрочные, теплоустойчивые, износоустойчивые, с особыми магнитными и электрическими свойствами и т.д.

В ряде случаев эти стали содержат такое большое количество легирующих элементов, что их нужно причислять не к сплавам железа, то есть не к сталям, а к сложным многокомпонентным сплавам. Однако четкой границы между такими сплавами и сталями нет. Поэтому их рассматривают вместе со сталями. Более того, некоторые из таких сплавов могут вовсе не содержать железа, хотя по свойствам и назначению они близки к сплавам, в которых основной элемент — железо.

12.1. КОРРОЗИОННОСТОЙКИЕ СТАЛИ

Хромистые нержавеющие стали. Хромистые стали (1X13, 2X13, 3X13, 4X13, X17, X28) коррозиестойки во влажной атмосфере и водяном паре, в водопроводной и речной воде. Все хромистые стали, в которых хрома более 12,5%, можно считать коррозионностойкими. При содержании хрома 13, 17 и 25% стали являются не только коррозиестойкими, но и жаростойкими. Стали с 13% хрома содержат углерода меньше 0,4%. Первая цифра в марке указывает содержание углерода в сотых долях процента.

Хром существенно изменяет критические точки стали, смещая эвтектоидную точку в области низких температур.

Хром образует с углеродом карбиды.

Однако наличие карбидов в стали увеличивает ее химическую неоднородность, а следовательно, способствует понижению коррозионной стойкости. Поэтому содержание углерода в коррозиестойких сталях невелико и обычно не превышает 0,4%. В зависимости от содержания углерода и хрома хромистые коррозиестойкие стали имеют разную структуру. По структуре они обычно относятся к сталям в нормализованном состоянии.

Хромоникелевые нержавеющие стали. Роль никеля в коррозиестойких сталях чрезвычайно велика. Никель расширяет область ау-

стенита. Низкоуглеродистые стали, содержащие более 24% Ni, при комнатной температуре имеют полностью аустенитную структуру. Дополнительное легирование никелем высокохромистых сталей также позволяет при определенном соотношении хрома и никеля получить стали с полностью аустенитной структурой.

Стали аустенитного класса обладают более высокой коррозионной стойкостью по сравнению с хромистыми сталями. Особенно хорошо они сопротивляются коррозии в атмосферных условиях, в том числе и в загрязненной атмосфере промышленных районов, содержащей сернистые газы. Никель повышает коррозионную стойкость сталей во многих органических кислотах и в H_2SO_4 .

Существенным преимуществом аустенитных сталей по сравнению с ферритными является их технологичность; эти стали обладают высокой пластичностью и вязкостью, хорошо свариваются. Из них можно изготавливать листовые детали методом холодной штамповки с глубокой вытяжкой, применяют особые способы сварки. Однако аустенитные стали имеют невысокую прочность.

Аустенитные хромоникелевые стали широко используют в конструкциях, изготавливаемых из листовой стали штамповкой и сваркой (обшивки, оболочки, емкости, трубопроводы); в самолето-, машино-, приборо- и судостроении; химической промышленности; архитектуре; быту.

Аустенитные хромоникелевые стали содержат большое количество дефицитного никеля, поэтому дороги. Их по возможности стремятся заменить безникелевыми или малоникелевыми сталями. Для замены никеля используют аустенитобразующие элементы — марганец и азот. Примером экономного легирования аустенитных сталей могут служить стали 10X14АГШ15 (0,15–0,25% Ni) и 10X14Г14Н4Т, применяемые в слабоагрессивных средах для оборудования пищевой промышленности.

Стали 15X17АГ14, 12X17Г9АН4 устойчивы против коррозии в органических кислотах, серной кислоте и морской воде. Эти свойства повышает также молибден. Для использования в аналогичных условиях применяют и стали 10X17Н13М2Т, 10X17Н13М3Т, которые сочетают в себе высокую коррозионную стойкость с хорошей технологичностью, начиная от выплавки и кончая изготовлением сварных конструкций и аппаратов.

Хромоникелевые стали аустенитно-ферритного класса используются как заменители аустенитных сталей, так как, обладая теми же механическими и достаточно высокими коррозионными свойствами в окислительных средах, они более технологичны и содержат

меньше дефицитного никеля. Эти стали характеризуются повышенным содержанием хрома по сравнению с аустенитными сталями типа 18% Cr; 9–10% Ni.

Аустенитно-ферритными являются стали 12Х21Н5Т, 08Х22Н6Т, 08Х20Н14С2 и др.

Преимуществами аустенитно-ферритных сталей по сравнению с аустенитными являются меньшее содержание никеля, повышенная прочность, меньшая склонность к межкристаллической коррозии, хорошая свариваемость. Как и аустенитные стали, они не упрочняются при закалке. После закалки (проводят для устранения наклепа, уменьшения склонности к межкристаллитной коррозии) эти стали имеют двухфазную аустенитно-ферритную структуру.

Аустенитно-ферритные стали используют в качестве заменителей аустенитных сталей в различных областях современной техники, особенно в машиностроении, судостроении, самолетостроении и др.

Недостатком этих сталей, ограничивающим их применение, можно считать нестабильность свойств при колебании химического состава в пределах марки, что вызывает изменения количественного соотношения аустенита и феррита, а также охрупчивание при нагреве (например, сталь 12Х21Н5Т).

Стали аустенитно-мартенситного класса используются в тех случаях, когда наряду с высокой коррозионной стойкостью требуется повышенная прочность. Обладая достаточно высокими коррозионной стойкими свойствами в окислительных средах, они значительно прочнее коррозионностойких сталей аустенитного класса.

Недостатком сталей мартенситно-аустенитного класса, например стали 09Х15Н8, следует считать сложность термообработки. После закалки с 975 °С сталь обрабатывают холодом (от –50 до –75 °С) и подвергают отпуску при 450–500 °С для снятия внутренних напряжений.

12.2. КИСЛОТОСТОЙКИЕ СТАЛИ И СПЛАВЫ

Кислотостойкими называются стали и сплавы, обладающие высоким сопротивлением коррозии в агрессивных кислотных средах: азотной, серной, соляной, фосфорных кислотах разной концентрации и при разных температурах.

В качестве кислотостойких применяют хромоникелевые аустенитные стали, дополнительно легированные молибденом и медью при одновременном увеличении содержания в них никеля.

Содержание углерода в таких сталях не превышает 0,1%. Для уменьшения склонности к межкристаллитной коррозии в них вводят

дополнительно титан, количество которого зависит от содержания углерода.

Наиболее высокой коррозионной стойкостью в агрессивных кислотных средах обладают никелевые сплавы: Ni—Mo; Ni—Cr; Ni—Cr—Mo. Примером никелемолибденового сплава является Н70МФ (0,02% С; 25—27% Мо; 1,4—1,7% V), который применяют для изготовления сварных емкостей, работающих в солянокислых средах и в растворах серной и фосфорной кислот. Никелевые сплавы, легированные хромом (до 50—60%), имеют высокое сопротивление коррозии в растворах азотной кислоты, в том числе и с добавлением ионов фтора.

Сплавы никеля с хромом и молибденом (например, ХН65МВ: 0,03% С; 14—16,5% Cr; 15—17% Мо; 3—4,5% W) могут быть использованы для работ в смесях никеля, в растворах очищающих солей и других средах.

Для особо агрессивных сред применяют сплавы на никелевой основе типа хастеллой (80% Ni + 20% Мо) с дополнительным легированием.

Эти сплавы обладают очень высокой коррозионной стойкостью в тех средах, где кроме них устойчивы лишь немногие металлы (например, в кипящей фосфорной кислоте концентрации до 50%, в кипящей соляной кислоте концентрации до 20% и др.).

Сплавы типа хастеллой обладают высокими механическими свойствами, которые могут быть улучшены термообработкой (закалка + старение) при 800 °С. При этом $\sigma_b = 1200$ МПа и твердость HB ~ 360.

Недостатком сплавов является их склонность к межкристаллитной коррозии, поэтому содержание углерода в них должно быть минимальным.

12.3. КОРРОЗИОННОСТОЙКИЕ ЧУГУНЫ

Такие чугуны стойки во многих агрессивных средах.

Кремнистые чугуны относятся к кислотостойким сплавам. Кремний, как и хром, расширяет область применения феррита. И сплавы, содержащие до 14,5% Si, имеют структуру однородного (водного) раствора. В кремнистых чугунах содержится всего лишь 0,3—0,8% углерода, при большем его содержании возможно выделение углерода в виде графита. В окислительных средах на поверхности образуется прочная пленка SiO₂, которая восстанавливается при незначительных повреждениях. Сплав Ф15, называемый также антихлором, содержит 3,5—4,5% Мо. В результате добавления молиб-

дена сплав устойчив в 10–30%-х растворах соляной кислоты при температуре до 90 °С. Все кремнистые чугуны обладают высокой окалиностойкостью. Из кремнистых чугунов изготавливают центробежные насосы, распылители кислот, краны, котлы и т.д.

Никелевые чугуны содержат около 1% Ni. Эти чугуны стойки в расплавах солей и концентрированных растворах щелочей. С увеличением содержания никеля коррозионная стойкость чугунов увеличивается. Состав никелевых чугунов может быть и более сложным — никелекремнистый аустенитный чугун содержит 1,7–2% С; 1,8–3% Cr; 5–7% Si; 16–20% Ni.

Хромистые чугуны содержат 26–30% Cr. Структура хромистых чугунов — твердый раствор хромистого феррита и эвтектические карбиды. Хромистые чугуны Х34 имеют высокую твердость (HВ = 325–400), хорошо сопротивляются износу, но плохо обрабатываются резанием.

Хромистые чугуны стойки в окислительных средах: в азотной кислоте любой концентрации при 20 °С и 40%-й кипящей; в концентрированной серной кислоте и других средах. Окалиностойкость сохраняется до 1000–1100 °С.

Из хромистых чугунов изготавливают детали и аппаратуру для азотной промышленности искусственных удобрений. Используют их и как жаростойкие материалы — для изготовления мелкого оборудования.

12.4. ЖАРОПРОЧНЫЕ СТАЛИ

Жаропрочность — способность металлов сопротивляться пластической деформации и разрушению при высоких температурах.

Стали, предназначенные для работы при высоких температурах, разделяют на теплостойкие, работающие в нагруженном состоянии при температурах до 600 °С; жаропрочные, работающие в нагруженном состоянии при более высоких температурах (до 850 °С) и обладающие при этом достаточной жаростойкостью; окалиностойкие (жаростойкие), работающие в слабонагруженном состоянии при температурах выше 550 °С.

В группу *теплостойких сталей* входят углеродистые, низколегированные и хромистые стали с различным дополнительным легированием. По структуре в нормализованном состоянии эти стали относятся к перлитному или мартенситному классам.

К *жаропрочным сталям* относятся высоколегированные стали аустенитного класса на хромоникелевой или хромоникельмарган-

цовистой основе, дополнительно легированные другими элементами.

Критериями оценки жаропрочности являются кратковременная и длительная прочность, ползучесть.

Рабочие температуры современных жаропрочных сплавов составляют примерно $(0,45-0,8)T_{пл}$. Требуемые сроки службы жаропрочных сплавов изменяются от одного-двух часов до сотен (авиационные газовые турбины) и многих тысяч часов (стационарные газовые и паровые турбины).

При температурах ниже $(0,45-0,5)T_{пл}$ прочность сплавов определяется стабильностью их структуры. При более высоких температурах стабильность дислокационной структуры нарушается.

Жаропрочные сплавы, предназначенные для работы при высоких температурах (до $700-950\text{ }^{\circ}\text{C}$), создают на основе железа, никеля, кобальта, а для работы при очень высоких температурах (до $1200-1500\text{ }^{\circ}\text{C}$) — на основе молибдена и других тугоплавких металлов. При температурах до $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ чаще используют стали на основе α -твердого раствора, а при более высоких температурах — стали на основе аустенитной структуры.

Перлитные жаропрочные стали. К этой группе относятся котельные стали и силхромы.

Котельные стали содержат небольшое количество углерода (около $0,15-0,20\%$). Это обусловлено тем, что детали котлов соединяют главным образом сваркой. Для котлов низких параметров применяют обычные низкоуглеродистые стали (сталь 20). Для котлов высоких параметров используют низкоуглеродистые и низколегированные стали.

После нормализации низкоуглеродистые стали имеют структуры: легированный феррит и перлит (стали 16М, 12МХ) или феррит и бейнит, а после закалки — мартенсит или мартенсит с бейнитом. Перлитные стали чаще подвергают нормализации и отпуску при $600-750\text{ }^{\circ}\text{C}$. После такой обработки сталь имеет структуру тонкопластинчатого перлита (сорбита) и обладает более высокой длительной жаропрочностью, чем после закалки и высокого отпуска, когда структура — зернистый сорбит.

Главным преимуществом легированных котельных сталей перед углеродистыми является их хорошее сопротивление ползучести. Предел ползучести является главной характеристикой котельных сталей.

Силхромы. Стали, легированные Cr и Si, называют силхромами. Эти стали содержат хром, кремний и молибден: 15Х5, 15Х5М,

40X9C2, 40X10C2M. Содержание углерода в них колеблется от 0,15 до 0,45%. Высокое содержание хрома и кремния делает эти стали не только жаропрочными, но и жаростойкими. Недостатком сильхромов является их склонность к отпускной хрупкости II рода.

Из сильхромов изготавливают клапаны двигателей внутреннего сгорания, регуляторы, теплообменники и другие подобные изделия, работающие при температурах до 700–800 °С. Сильхромовые стали закаливают на воздухе.

Аустенитные жаропрочные стали. Высоколегированные аустенитные коррозионностойкие стали могут быть использованы и как жаропрочные, применяемые для работы до 700–800 °С. В жаропрочных аустенитных сталях содержится 10–20% Ni и 15–20% Cr.

По структуре такие стали подразделяются на две группы:

- аустенитные стали, имеющие гомогенную структуру и поэтому не упрочняемые термообработкой (содержание углерода в них минимально);
- аустенитные стали с гетерогенной структурой. Их прочность можно повышать термообработкой — закалкой и старением.

К *первой* из названных групп относят стали 17X18H9, 09X14H19B2BP1, 12X18H12T, 20X25H20C2 и т.д. При нагреве эти стали не испытывают фазовых превращений. Легирование ниобием увеличивает длительную прочность и сопротивление ползучести. Для создания большей однородности аустенитные стали подвергают закалке при 1050–1100 °С в воде, а затем для стабилизации структуры проводят отпуск при 750 °С.

Ко *второй* группе относят стали типа 37X12H8Г8МФБ, 45X14H14B2M, 10X11H20T3P и др. Эти стали также закаливают с 1050–1100 °С, затем проводят отпуск-старение при 600–750 °С. В процессе выдержки при этих температурах в дисперсном виде выделяются карбиды, карбонитриды и интерметаллидные фазы, вследствие чего прочность стали растёт.

Жаропрочность гетерогенных аустенитных сталей выше, чем гомогенных, но свойства гетерогенных сталей нестабильны во времени. Аустенитные жаропрочные стали пластичны и вязки. Они плохо обрабатываются резанием. Эти стали используют для изготовления паровых котлов высоких параметров, сопловых аппаратов реактивных двигателей и др.

Мартенситные жаропрочные стали. В состав этих сталей входят хром и вольфрам, которые повышают температуру рекристаллизации и, образуя карбиды, улучшают жаропрочность. Рабочие температуры этих сталей могут достигать 580–600 °С.

Для получения оптимальной жаропрочности высокохромистые стали закаливают на мартенсит. После отпуска структура сталей — сорбит и троостит.

Сильхромы относят также к классу мартенситных сталей.

12.5. ЖАРОСТОЙКИЕ СТАЛИ

В результате взаимодействия с окружающей газовой или парообразующей средой большинство металлов и сплавов подвергаются газовой коррозии. Этот процесс зависит от температуры, состава газовой среды и состава металла. В большинстве случаев газовая коррозия происходит в результате взаимодействия металла с кислородом.

Способность металла сопротивляться окислению в газовой среде при высоких температурах называется *жаростойкостью* или *окалиностойкостью*.

Жаростойкие сплавы — преимущественно сплавы железа с хромом. Для увеличения жаростойкости добавляют алюминий и кремний.

Кроме сильхромов используют еще стали, легированные Cr и Al. Кремний придает стали жаростойкость в основном в окислительной атмосфере. В присутствии газов, содержащих большое количество паров воды, и при высоких температурах эти сплавы менее жаростойки, чем хромистые и хромоникелевые.

Молибден в сталь X16M вводится для устранения тепловой хрупкости. Эта сталь способна к самозакаливанию на воздухе. Поэтому после каждой операции горячей обработки необходим обжиг при $T = 860\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Стали 4X9C2 и 10X13C10 обладают высокой жаростойкостью; их применяют для изготовления клапанов двигателей внутреннего сгорания и печного оборудования. Закаливают их с $975\text{ }^{\circ}\text{C}$ в масле с последующим отпуском при $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ с быстрым охлаждением на воздухе.

Сталь 08X17T относится к ферритному классу; ее применяют в теплообменниках. При добавках кремния становится стойкой даже в среде, содержащей серу и ее соединения.

Стали 12XH9T, 36X18H25C2 относятся к аустенитному классу, обладают хорошими технологическими свойствами и повышенной механической прочностью при высоких температурах. Из-за добавок кремния обладают высокой жаростойкостью, особенно в средах с повышенным содержанием серы. Применяют эти стали для изготовления печных конвейеров и других нагруженных де-

талей, а также сопловых аппаратов и паровых турбин в газотурбинных установках.

Широкое применение в промышленности находит жаростойкий чугун как наиболее дешевый и доступный материал. Для деталей, работающих до 300 °С, могут использоваться простые серые чугуны при условии получения мелкого графита; до 450–500 °С удовлетворительными характеристиками обладают модифицированный и ковкий чугуны. Незначительное легирование хромом (иногда совместно с никелем) позволяет повышать температуру использования чугунов до 700 °С. При выборе чугуна помимо жаростойкости необходимо принимать во внимание изменение механических свойств в зависимости от рабочей температуры, а также исходить из экономической целесообразности его применения.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие стали относят к сталям с особыми свойствами?
2. Какие стали называют нержавеющей?
3. Назовите основные легирующие элементы, обеспечивающие сталям высокие антикоррозионные свойства.
4. Какой легирующий элемент расширяет область аустенита и какой элемент является его заменителем в нержавеющей сталях?
5. Перечислите виды сталей специального назначения.
6. Какие стали называют жаропрочными, а какие — жаростойкими? Чем они отличаются по своему составу?

Глава 13

СТАЛИ И СПЛАВЫ

С ОСОБЫМИ ФИЗИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

13.1. МАГНИТНЫЕ СТАЛИ И СПЛАВЫ

Из всех металлов железо, никель, кобальт (также гадолиний при температурах ниже 0 °С) обладают ферромагнетизмом. Во внешнем магнитном поле эти металлы сильно намагничиваются. Способность металлов намагничиваться широко используют в технике.

Важнейшими характеристиками, определяющими магнитные свойства, являются остаточная индукция B_r и коэрцитивная сила H_c .

Остаточная индукция B_r — индукция, остающаяся в образце после снятия внешнего поля.

Интенсивность намагничивания J возрастает с увеличением напряженности магнитного поля H :

$$J = \chi H.$$

Коэффициент пропорциональности χ называется магнитной восприимчивостью. Магнитное состояние образца, помещенного в магнитное поле, чаще выражают через магнитную индукцию B :

$$B = \mu H = 4\pi J + H;$$

$$\mu = 1 + 4\pi\chi,$$

где μ — магнитная проницаемость.

Наращение магнитной индукции происходит неодинаково при разных напряжениях внешнего поля, и поэтому магнитная проницаемость будет переменной величиной (на рис. 13.1 пунктирная кривая). Площадь, ограниченная петлей гистерезиса, пропорциональна работе, которая затрачивается на нагревание ферромагнетика и определяет потерю энергии при перемагничивании.

Магнитные стали и сплавы по назначению подразделяются на *магнитомягкие* и *магнитотвердые*, различающиеся значениями основных магнитных характеристик, а также формой петли гистерезиса. Среди них немало сплавов, относящихся к сплавам с повышенной чистотой.

Магнитомягкие материалы. Для сплавов этой группы характерны малая коэрцитивная сила H_c , высокая магнитная проницаемость μ и узкая петля гистерезиса (рис. 13.2). Эти сплавы должны иметь высокое удельное сопротивление, с увеличением которого уменьшаются потери на паразитные вихревые токи.

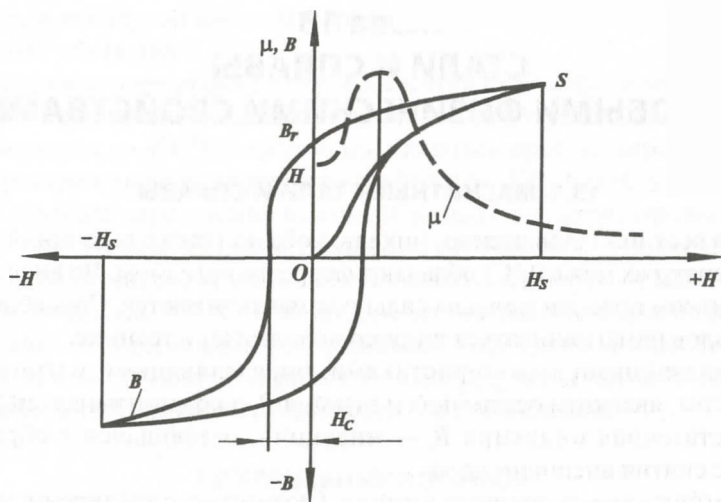


Рис. 13.1. Петля гистерезиса:

OS — кривая первичного намагничивания; μ — магнитная проницаемость

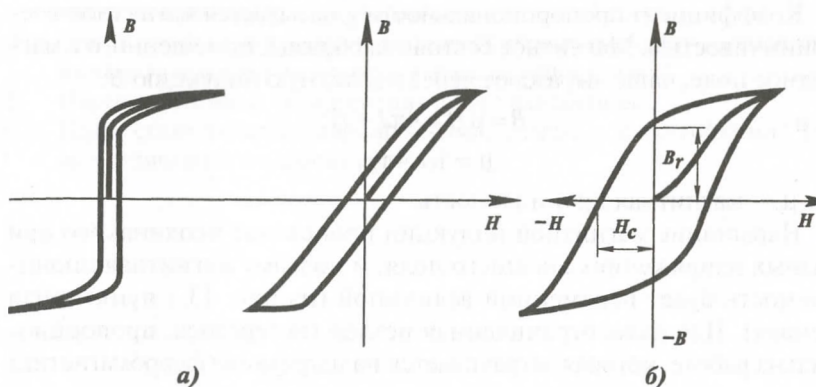


Рис. 13.2. Гистерезисные кривые для магнитомягкого (а) и магнитотвердого (б) сплавов

В зависимости от показателей ферромагнитных свойств и областей применения магнитомягкие материалы подразделяются на *низкочастотные*, *высокочастотные* и *материалы с особыми магнитными свойствами*.

Техническое железо. Наиболее простым по составу магнитомягким материалом является чистое железо. Чем меньше количество примесей в нем содержится, тем выше магнитная проницаемость. Недостатком является низкое электросопротивление. Наклеп, увели-

чивая коэрцитивную силу, снижает магнитную проницаемость. Поэтому железо и кремнистые стали всех марок используют в отожженном состоянии.

Электротехническую сталь в зависимости от применения делят на динамную и трансформаторную. Эти стали содержат менее 0,1% углерода и 0,8% кремния. Трансформаторная сталь более пластичная и менее магнитомягкая. Кремний образует с железом твердый раствор, тем самым увеличивая электросопротивление (кремнистые электротехнические стали относятся к ферритному классу), и уменьшает склонность стали к росту зерна, что, в свою очередь, увеличивает магнитную проницаемость.

Особо чистые сорта железа после специальной обработки также имеют высокую магнитную проницаемость и малую коэрцитивную силу, но обладают низким электросопротивлением и имеют большие потери на вихревые токи. Такое железо можно применять в качестве магнитомягкого материала для изготовления сердечников, полюсных наконечников электромагнитов и др.

Магнитомягкое железо и кремнистые стали маркируют буквой Э. Для железа далее следуют буквы А, характеризующие степень чистоты по примесям: Э, ЭА, ЭАА. Электротехническую кремнистую сталь маркируют так: Э11, Э12 и т.д., где первая цифра показывает содержание кремния в процентах, вторая — гарантированные электрические и магнитные свойства.

Железоникелевые сплавы (пермаллой). В ряде случаев требуются сплавы с высокой начальной магнитной проницаемостью в слабых магнитных полях. Такие сплавы называются *пермаллоями*. Это сплавы железа с никелем (38–85% Ni), часто с добавкой молибдена (3,2–3,8%). Магнитная проницаемость этих сплавов существенно зависит от состава и термической обработки. Наиболее высокую начальную магнитную проницаемость сплав получает при высокотемпературном нагреве в атмосфере водорода (для укрупнения зерна, удаления примеси углерода, устранения остаточных напряжений). Охлаждение в магнитном поле повышает магнитные характеристики.

Состав пермаллоев техническими условиями не оговаривается. Марка указывает лишь примерный состав сплава, но магнитная характеристика должна быть обеспечена.

Первые две цифры в маркировке показывают содержание никеля в процентах; буква, следующая после буквы Н, — дополнительное легирование (Х — хром, С — кремний, М — молибден). В зависимости от фактических магнитных свойств сплав может быть высшего качества (с буквой А) или обычного качества (без буквы А).

Прочие магнитомягкие сплавы. *Алсифер* — сплав системы «железо — алюминий — кремний». Он обладает высокой магнитной проницаемостью в слабых полях и имеет небольшую коэрцитивную силу. Алсифер по сравнению с пермаллоем является дешевым материалом, так как не содержит дефицитных элементов. Однако алсифер хрупок, из него нельзя изготавливать листы. Поэтому его применяют в виде порошков. Детали из алсифера можно изготавливать только фасонным литьем.

Пермендюр — сплав железа с кобальтом и ванадием (50% Co; 1,8% V; остальное — железо). Характеризуется высокой индукцией насыщения и повышенной стабильностью во времени, обратимой магнитной проницаемостью. Применяют для изготовления приборов при необходимости сконцентрировать в небольшом пространстве мощный поток силовых линий.

Термаллой — сплав, магнитная индукция которого весьма резко изменяется в интервале температур от -60 до $+50$ °С. Применяют для автоматической корректировки погрешностей магнитоэлектрических приборов. Практическое значение получили сплавы с 30% Ni, остальное — железо (термаллой) и с 30% Cu, остальное — железо (кальмаллой).

Ферриты. Другим существенным фактором, позволяющим резко сократить электрические потери, является повышение удельного электросопротивления самого ферромагнетика. Высокое электрическое сопротивление имеют магнитные материалы, называемые *ферритами*, которые играют исключительно важную роль в современной электронике.

Ферриты представляют собой магнитные материалы, получаемые из оксидов методом порошковой металлургии. Они обладают ценными свойствами. К ним в первую очередь следует отнести совмещение в одном материале свойств ферромагнетика и диэлектрика. Удельное электросопротивление у некоторых ферритов очень высоко и достигает 10^{12} Ом/см (у металлов оно порядка 10^{-5} Ом/см). Это определяет возможность их применения в устройствах, работающих в области высоких и сверхвысоких частот.

Технология производства ферритов проста и может быть легко автоматизирована, поэтому себестоимость ферритных сердечников значительно ниже наборных металлических сердечников.

Ферриты представляют собой двойные оксиды металлов. Особенно большое значение имеют ферриты, выражаемые химической формулой $MeOFe_2O_3$, где Me — двухвалентный ион металла (Fe, Ni, Co, Mg, Zn и др.). Эти ферриты имеют кубическую решетку типа

шпинели (MgOAl_2O_3) и поэтому называются шпинелидами. Применяют и ферриты другого типа: $\text{MeO}(\text{Fe}_2\text{O}_3)_6$ (гексаферриты) или $3\text{Me}_2\text{O}_3\cdot 5\text{Fe}_2\text{O}_3$ (гранаты) и др.

Магнитотвердые сплавы. Магнитотвердые материалы используют для изготовления постоянных магнитов различного назначения. Они имеют большую остаточную индукцию, высокую коэрцитивную силу и небольшую магнитную проницаемость. Для них характерна широкая петля гистерезиса (см. рис. 13.2). Важнейшей характеристикой этих сплавов является максимальная удельная магнитная энергия (отнесенная к 1 м^3 объема магнита) W_{max} , Дж/м³. Большие значения W_{max} соответствуют высоким значениям остаточной индукции, коэрцитивной силе и большей выпуклости кривой размагничивания.

Сплавы для постоянных магнитов удобно классифицировать по технологии производства: деформируемые, литые, спеченные и прессмагниты.

Деформируемые сплавы. Стали, используемые для постоянных магнитов, должны содержать большое количество углерода, который обязательно должен находиться в твердом растворе; сталь должна быть закалена в мартенсит.

Наиболее простыми по составу и дешевыми являются высокоуглеродистые стали У8–У10, применяющиеся для изготовления мелких неотчетливых магнитов. Более качественными являются хромистые стали ЕХ3, ЕХ5К5, ЕХ9К15М2 (буква Е в маркировке обозначает магнитотвердую сталь). Добавка кобальта значительно повышает магнитные свойства стали.

Другая группа деформируемых сплавов практически не содержит углерода и принадлежат в основном к системам Fe–Co–Mo (комоль), Cu–Ni–Co (кунико), Fe–V–Co (викаллой) и др. Эти сплавы обладают высокой пластичностью, и из них легко получают проволоки, ленты, полосы. В основном их применяют для изготовления активной части роторов гистерезисных двигателей, лент и проволок для магнитной записи, магнитов сложной формы и тонких стрелок.

Литые сплавы. К этой группе относятся наиболее распространенные сплавы для постоянных магнитов на основе системы Fe–Ni–Al (15–25% Ni; 8–15% Al) с дополнительным введением Co, Cu и других компонентов. Эти сплавы относятся к дисперсно-твердеющим. Более 80% общего количества постоянных магнитов изготавливают из сплава данной системы. Наилучшие сплавы этой группы имеют очень большую величину магнитной мощности. Их достоин-

ством является также высокая коэрцитивная сила, которая на порядок выше, чем у углеродистой и хромистой сталей.

Магниты из этих сплавов получают методом точного литья. Недостатком литых сплавов является большая твердость и хрупкость, что делает практически невозможным применение всех видов обработки этих сплавов, кроме шлифования.

Спеченные материалы. Мелкие магниты изготавливают методом спекания. В этом случае используют порошки железа, никеля, алюминия и других легирующих элементов высокой чистоты. Спеченные магнитотвердые сплавы имеют ряд преимуществ перед литыми сплавами: они обладают повышенной прочностью, что объясняется малой величиной зерна; не образуют усадочных раковин, обеспечивают более точные размеры, а также лучшее качество поверхности.

Порошковые сплавы системы Fe—Ni—Al можно изготовить из порошка измельченного литого сплава или из порошков элементов, входящих в эти сплавы, путем прессования и спекания порошков при высокой температуре (1300 °С для спекания порошков металлов) в атмосфере водорода или высоком вакууме во избежание окисления. При спекании происходит уменьшение размеров на 10—15%.

Успешное развитие металлокерамических магнитов привело к тому, что в настоящее время они по своим магнитным свойствам мало уступают литым магнитам того же состава. Маркируются такие сплавы буквами ММК (магнит металлокерамический) и цифрами, обозначающими порядковый номер сплава (ММК1, ММК7, ММК11).

Методом спекания получают магниты и из магнитотвердых ферритов. По своей природе они обладают магнитной индукцией, но чрезвычайно большой коэрцитивной силой, что позволяет использовать их в качестве магнитотвердых материалов. Из-за дешевизны и высоких магнитных свойств наиболее широкое применение получили бариевые ферриты ($\text{BaO}_6\text{Fe}_2\text{O}_3$).

В последние годы привлекают внимание новые магнитные материалы, представляющие собой соединения редкоземельных элементов с Co, Fe, Cu. Лучшими свойствами обладают магниты $\text{Sm}(\text{CoC}_4)_5$. Магниты из этих сплавов чаще всего изготавливают прессованием измельченного сплава в магнитном поле.

Немагнитные стали. В электрическом машиностроении от материала иногда требуются немагнитность ($\mu < 1,05$) и механическая прочность одновременно. Для этой цели применяют немагнитные аустенитные стали. Аустенитные нержавеющие стали, или износостойкие

устойчивые стали, пригодны как немагнитные, если по прочностным свойствам они удовлетворяют поставленным требованиям.

В качестве немагнитных сталей раньше использовали стали с высоким содержанием никеля (ЭИ269). В настоящее время найдены составы с меньшим содержанием никеля (55Г9Н9Х3) или даже совершенно без никеля (45Г17103), где в качестве аустенитообразователя выступает марганец.

В ряде случаев применяют немагнитный чугуны, что достигается глубоким легированием чугуна никелем и медью. Такие чугуны обладают и более высокими механическими свойствами по сравнению с обычными серыми чугунами.

13.2. СТАЛИ И СПЛАВЫ С ВЫСОКИМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

Такие материалы необходимы для производства прецизионных элементов сопротивления (обмоток потенциометров, шунтов, катушек сопротивления, резисторов термпар, тензометрических датчиков) и нагревательных элементов электрических приборов и печей.

Высокое электрическое сопротивление сплавов может быть достигнуто в том случае, если их структура — твердый раствор. Кроме того, эти сплавы должны обладать малым температурным коэффициентом электросопротивления, а также высокой окислительной стойкостью, что особенно важно для нагревательных элементов, и достаточной прочностью для сохранения формы нагревателей. Все сплавы с повышенным электросопротивлением делят на две группы: реостатные сплавы, рабочая температура которых не выше 500 °С, и сплавы для нагревательных элементов, рабочая температура которых значительно выше и доходит до 1100 °С.

Реостатные сплавы — это сплавы на медной основе с никелем и марганцем. Сплавы меди с никелем и марганцем образуют непрерывный ряд твердых растворов. Сплавы с 40–50% Ni обладают максимальным электросопротивлением и отрицательным коэффициентом электросопротивления. Наименьший температурный коэффициент электросопротивления имеет манганин. Сплавы константан и копель в паре с медью обладают большой ТЭДС, поэтому в измерительных схемах и для прецизионных сопротивлений используют манганин. Константан и копель используют для изготовления термпар.

Для получения стабильных значений электросопротивления и коэффициента электросопротивления проволоку из манганина под-

вергают рекристаллизационному отжигу в вакууме при 400 °С, а после достижения сопротивления подвергают повторному невысокому нагреву (250 °С) для устранения остаточных напряжений.

Сплавы для нагревательных элементов — это сплавы на железной и никелевой основе, что обеспечивает высокое электросопротивление вследствие образования твердых растворов. Для повышения жаростойкости сплавы должны содержать много хрома и алюминия. Однако последний ухудшает пластичность сплава и тем самым затрудняет получение проволоки. Количество углерода строго ограничено (0,06–0,12%), так как появление карбидов снижает пластичность и сокращает срок службы нагревателей.

Твердые сплавы на основе никеля обладают высоким электросопротивлением. Наиболее простыми сплавами являются нихромы (Ni, Cr). Лучший из них — сплав X20Н80 — работает при температурах до 1050–1100 °С. Для удешевления нихромов и улучшения их технологических свойств часть никеля заменяют железом. Нихромы с железом называют *ферронихромами*. Широкой известностью пользуется ферронихром X15Н60, содержащий 25% Fe, который рекомендуется для работы при 950–1100 °С. Удельное электросопротивление нихрома составляет 1,0–1,2 Ом·мм²/м, и окислостойкость — до 1000–1100 °С.

Нихромы применяют для изготовления бытовых приборов и нагревательных элементов электропечей и деталей высокого омического сопротивления. Нихромы и ферронихромы более пластичны и жаропрочны, чем сплавы Fe–Cr–Al, но значительно дороже их.

При температурах выше 1200 °С используют сплавы на основе тугоплавких металлов (W, Ta, Mo), а также керамические материалы (силит). Силитовые стержни спекают из карбида кремния и используют в качестве нагревателей в электрических печах до 1500 °С. Силит является полупроводниковым материалом и имеет высокое электросопротивление.

13.3. СПЛАВЫ С ЗАДАНЫМ ЗНАЧЕНИЕМ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОвого РАСШИРЕНИЯ

В приборостроении в ряде случаев требуются сплавы с самыми разнообразными свойствами, например сплавы с заданными коэффициентами линейного расширения. Чтобы удовлетворить этим требованиям, для каждого конкретного случая применения изготавливают сплавы строго определенного состава. Их, как и магнитные и электротехнические сплавы, часто называют *прецизионными спла-*

вами. Такое название обусловлено повышенной стабильностью количества легирующих элементов в сплавах, что обеспечивает постоянство их свойств.

Зависимость расширения металла от температуры нагрева носит нелинейный характер.

Сплав с 36% Ni, называемый *инваром*, — основной представитель сплавов с минимальным коэффициентом расширения α . Низкое значение коэффициента α в области комнатных температур, а также хорошие механические, технологические и антикоррозионные свойства позволили использовать инвар как конструкционный материал для изготовления деталей приборов, от которых требуется постоянство размеров при изменении температуры в условиях эксплуатации. Малый коэффициент теплового расширения инвара сохраняется лишь в интервале от -80 до $+100$ °C; выше и ниже этого интервала коэффициент расширения инвара резко возрастает.

Сплав с 42% Ni отличается тем, что имеет постоянный коэффициент расширения в интервале от 20 до 200 °C; вне этого интервала температур его коэффициент возрастает, то есть сплав расширяется более интенсивно. Другими словами, для сплавов системы Fe—Ni существует интервал температур, в пределах которого коэффициент линейного расширения не изменяется. Верхняя температура этого интервала тем выше, чем больше в сплаве содержание никеля.

Для различных инварных сплавов значения коэффициента теплового расширения в значительной степени зависят от содержания примесей (особенно углерода) и технологии термической обработки сплава. Углерод в процессе термообработки образует с железом и никелем пересыщенные твердые растворы внедрения. В процессе эксплуатации углерод, выделяясь, вызывает изменение значения коэффициента α .

Инвар дополнительно улучшают легированием кобальтом, который частично заменяет в сплаве никель. Сплав такого типа, называемый *суперинваром*, имеет еще более низкое значение коэффициента α , чем простой инвар.

Особую группу составляют сплавы для пайки и сварки со стеклом. Составы этих сплавов подобраны таким образом, чтобы коэффициент α_c сплава соответствовал коэффициенту α_m материала, с которым производится соединение, во всем интервале температур, вплоть до размягчения стекла.

Помимо этого выдвигается ряд дополнительных требований к сплаву: пластичность, обеспечивающая хорошую обрабатываемость давлением; способность сварки или спайки со стеклами, что

позволяет получить вакуумно-плотное соединение. Одинаковый коэффициент α у материалов обеспечивает сохранение такого соединения при нагреве и охлаждении в процессе изготовления и при изменении температуры в условиях эксплуатации.

Основной представитель этой группы — сплав 29НК, называемый *коваром*. Этот сплав имеет такой же коэффициент α , как терmostойкое стекло, вольфрам и молибден, пластичен и хорошо обрабатывается давлением, а поэтому заменяет в электровакуумном производстве менее пластичный вольфрам и нежаростойкий молибден.

Сплав 47НД относится к группе сплавов, имеющих такой же коэффициент α , как платина и нетерmostойкие — «мягкие» — стекла. Этот сплав называют *платинитом* и используют для сварки и пайки с такими стеклами в электровакуумной промышленности.

Для пайки с керамикой используют сплав 33НК, являющийся аналогом ковара, но имеющий повышенное содержание никеля.

13.4. СПЛАВЫ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

В теории мартенситного превращения считается, что бездиффузионность и кооперативный характер смещения атомов при превращении ответственны за когерентность решеток аустенита и мартенсита на первых стадиях процесса и приводят к огромной скорости движения межфазной границы, то есть к росту мартенситного кристалла. Однако этот рост, в свою очередь, приводит к накоплению упругой деформации на когерентной границе и к последующему нарушению когерентности. Рост кристалла мартенсита прекращается, и превращение развивается за счет образования новых кристаллов.

Представление о когерентном росте кристаллов мартенсита лежит в основе термоупругого мартенситного превращения: понижение температуры ведет к постепенному росту мартенситных кристаллов, а повышение — к их исчезновению.

При нагреве выше температуры метастабильного равновесия T_0 свободная энергия мартенсита становится больше свободной энергии аустенита и возможно обратное превращение мартенсита в аустенит. Превращение начинается после определенного перегрева ($A_n - T_0$) (рис. 13.3) и заканчивается при температуре A_k новой фазы (в данном случае — аустенита). Как и в прямом превращении, температурный гистерезис при обратном превращении обусловлен наличием упругой и поверхностной энергии, препятствующей образованию. Обратное превращение протекает по такому же сдвиговому

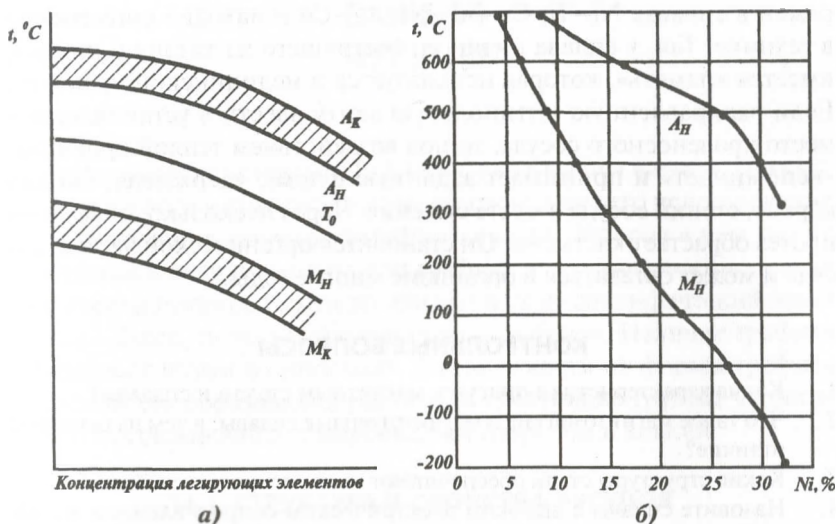


Рис. 13.3. Температуры прямого (M_n – M_k) и обратного (A_n – A_k) превращений:
а — схема; б — температуры M_n – A_n в системе Fe–Ni

механизму, как и прямое, и имеет такие же характерные черты: бездиффузионность, образование рельефа и т.д.

В сталях обратное превращение не имеет места, так как из-за высокой подвижности атомов углерода в твердом растворе внедрения еще до достижения температуры A_n успевают произойти процессы диффузионного распада мартенсита с образованием равновесных фаз — карбида и феррита (перлита). Превращение перлита в мартенсит невозможно, так как при всех температурах мартенсит обладает большей свободной энергией, чем перлит. Поэтому обратное превращение наблюдается только в безуглеродистых высоколегированных сплавах, например в системе Fe–Ni; оно также типично для мартенситных превращений в цветных сплавах.

Сказанное лежит в основе эффекта запоминания формы, который заключается в том, что образцу, имеющему характерную форму при повышенной температуре, придают с помощью деформации при более низкой температуре (ниже или в районе M_n) другую форму, а при последующем нагреве выше температуры A_n происходит полный возврат образца к первоначальной форме; одновременно происходит возврат всех физико-механических свойств. При изотермической выдержке возврат прекращается. Дальнейшее повышение температуры возобновляет возврат, что, безусловно, свидетельствует о термоупругом характере превращения. Эффект памяти четко вы-

ражен в сплавах Ni–Ti; Cu–Al–Ni; Ag–Cd и находит применение в технике. Так, у сплава нитинол, состоящего из титана и никеля, имеется «память», которая используется в медицинской практике. Если расправленную нитиноловую ленту ввести в установленное место кровеносного сосуда, то под воздействием теплой крови она «вспоминает» и принимает заданную форму, удерживая, словно каркас, стенки сосуда в месте сужения. Через несколько дней такой протез обрастает клетками. Он становится органической частью сосуда и может оставаться в организме многие годы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие характеристики присущи магнитным сталям и сплавам?
2. Что такое магнитомягкие и магнитотвердые сплавы, в чем их основное отличие?
3. Какие структуры стали обеспечивают ее немагнитные свойства?
4. Назовите сплавы с высоким электрическим сопротивлением и с заданным значением коэффициента теплового расширения.
5. Перечислите области применения сплавов с эффектом памяти формы.

Глава 14 ЧУГУНЫ

Сплав железа с углеродом ($> 2,14\% \text{ C}$) называется *чугуном*. Присутствие эвтектики в структуре чугуна обуславливает его использование исключительно в качестве литейного сплава. Углерод в нем может находиться в виде цементита или графита или одновременно в виде цементита и графита. Цементит придает излому специфический *белый* светлый блеск, поэтому чугун называется *белым*. Наличие графита окрашивает излом в *серый* цвет. В зависимости от формы графита и условий его образования различают следующие группы чугунов: серый, высокопрочный с шаровидным графитом и ковкий.

14.1. СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЧУГУНОВ

В микроструктуре чугуна следует различать металлическую основу и графитные включения.

В зависимости от содержания углерода, связанного в цементит, различают несколько видов чугунов.

Белый чугун — весь углерод находится в виде Fe_3C . Структура чугуна — перлит и ледобурит.

Половинчатый чугун — большая часть углерода (свыше $0,8\%$) находится в виде Fe_3C .

Структура чугуна — перлит, ледобурит и пластинчатый графит.

Перлитный серый чугун. Структура — перлит и пластинчатый графит.

В этом чугуне $0,7\text{--}0,8\%$ углерода, и он находится в виде Fe_3C , входящего в состав перлита.

Ферритно-перлитный серый чугун. Структура — перлит, феррит и пластинчатый графит. В этом чугуне в зависимости от степени распада эвтектоидного цементита в связанном состоянии находится от $0,7$ до $0,1\% \text{ C}$.

Ферритный серый чугун. Структура — феррит и пластинчатый графит. В этом случае весь углерод находится в виде графита.

По структуре чугуны отличаются от стали тем, что в чугунах имеются графитовые включения, что предопределяет их специфические свойства.

Металлическая основа в серых чугунах обеспечивает наибольшую прочность и износостойкость, если она имеет перлитную структуру.

Присутствие в структуре феррита, не увеличивая пластичности и вязкости чугуна, снижает его прочность и износостойкость. Наименьшей прочностью обладает ферритный серый чугун.

Графит в чугунах может быть следующих основных форм.

Пластинчатый графит. В обычном сером чугуне графит образуется в виде прожилок лепестков; такой графит называется *пластинчатым*.

Шаровидный графит. В высокопрочных чугунах, выплавленных с присадкой небольшого количества магния, графит преобразуется в шаровидную форму.

Вермикулярный графит. Пластинчатая форма графита ухудшает свойства чугуна, поэтому разработаны методы плавки или последующей обработки, при которых изменяется форма графита и улучшаются свойства чугуна. В настоящее время получают серый чугун с волокнистой (червеобразной) формой графита. Такой графит получил название *вермикулярного*.

Хлопьевидный графит. Если при отливке получить белый чугун, а затем, используя неустойчивость цементита, путем отжига его разложить, то образующийся графит приобретает равноосную форму. Такой графит называется *хлопьевидным* или *углеродом отжига*. На практике чугуны с хлопьевидным графитом называют *ковким чугуном*.

Таким образом, чугун с пластинчатым графитом называют обычным *серым чугуном*, чугун с шаровидным и вермикулярным графитом — *высокопрочным чугуном*, чугун с хлопьевидным графитом — *ковким чугуном*.

14.2. СЕРЫЕ ЧУГУНЫ

В структуре серых чугунов большая часть или весь углерод находится в виде графита. Наибольшее применение нашли доэвтектические группы, содержащие 2,4—3,8% С. Чем выше содержание С, тем больше образуется графита и тем ниже механические свойства чугуна. В связи с этим количество углерода в чугуне обычно не превышает 3,8%. В то же время для обеспечения высоких литейных свойств (хорошей жидкотекучести) углерода должно быть не меньше 2,4%.

Поскольку структура чугуна состоит из металлической основы и графита, то и свойства чугуна будут зависеть от свойств металлической основы и количества и характера графитных включений.

Чем меньше графитовых включений, чем они мельче и больше степень изолированности их друг от друга, тем выше прочность чу-

гуна. Чугун с мелкими и завыхренными графитными включениями обладает более высокими свойствами.

Разрушающая нагрузка при сжатии в зависимости от структуры чугуна в 3–5 раз больше, чем при растяжении, поэтому чугун нужно использовать для изделий, работающих на сжатие.

Пластинки графита менее значительно, чем при растяжении, снижают прочность при изгибе, так как часть изделия при этом испытывает сжимающие напряжения. Предел прочности при изгибе имеет промежуточное значение между пределом прочности на растяжение и пределом прочности на сжатие.

Твердость чугуна в зависимости от металлической основы равна 143–255 НВ.

Округлые включения шаровидного графита не создают резкой концентрации напряжений, и чугун с шаровидным графитом показывает значительно более высокую прочность при растяжении и изгибе, чем чугун с пластинчатым графитом. Отсюда и название чугуна с шаровидным графитом — *высокопрочный чугун*. Ковкий чугун с хлопьевидным графитом занимает промежуточное положение по прочности между обычным серым и высокопрочным чугуном.

Таким образом, прочность чугуна (в отношении нормальных напряжений) определяется строением металлической основы и формой графитных включений.

Благодаря наличию графита чугун имеет некоторые преимущества перед сталью:

- наличие графита облегчает обрабатываемость резанием, делает стружку ломкой;
- графит повышает износостойкость и антифрикционные свойства чугуна вследствие собственного «смазывающего» действия и повышения прочности пленки смазки;
- наличие графитных включений быстро гасит вибрации и резонансные колебания;
- чугун почти не чувствителен к дефектам поверхности, надрезам и т.д. Графит, нарушая сплошность металлической основы, делает чугун малочувствительным ко всевозможным внешним концентраторам напряжений (дефектам поверхности, надрезам, выточкам и т.д.). Вследствие этого серый чугун имеет примерно одинаковую конструктивную прочность и в отливках простой формы или с ровной поверхностью, и в отливках сложной формы с надрезом или плохо обработанной поверхностью;
- следует также указать на превосходство чугуна перед сталью по литейным свойствам. Более низкая температура плавления

и окончание кристаллизации при постоянной температуре (образование эвтектики) обеспечивают лучшую жидкотекучесть и заполняемость формы.

Указанные достоинства чугуна делают его ценным конструкционным материалом, широко применяемым для изготовления деталей машин, главным образом тогда, когда детали не испытывают значительных растягивающих и ударных нагрузок.

Серый чугун маркируется буквами С (серый) и Ч (чугун). После букв следуют цифры, указывающие среднее значение временного сопротивления при растяжении.

Серые чугуны по свойствам и применению можно разделить на следующие группы.

Ферритные и ферритно-перлитные чугуны (СЧ10, СЧ15) имеют при растяжении σ_b 10–15 кгс/мм² (100–150 МПа), при изгибе — 28–32 кгс/мм² (280–320 МПа). Их примерный состав: 3,5–3,7% С; 2,0–2,6% Si; 0,5–0,8% Mn; $\leq 0,3\%$ Р; $\leq 0,15\%$ S. Структура чугуна — перлит, феррит и графит грубый и средних размеров. Эти чугуны применяют для изготовления малоответственных деталей, испытывающих небольшие нагрузки в работе с толщиной стенки отливки 10–30 мм. Так, чугун СЧ10 используют для изготовления строительных колонн, фундаментных плит, а чугуны СЧ15 и СЧ18 — для литых малонагруженных деталей станков, автомобилей и тракторов, арматуры.

Перлитные чугуны (СЧ21, СЧ32, СЧ36, СЧ40) применяют для отливки станин мощных станков и механизмов, поршней цилиндров, деталей, работающих на износ в условиях больших давлений (компрессорное, турбинное литье, дизельные цилиндры, блоки двигателей, детали металлургического оборудования). Структура этих чугунов — мелкопластинчатый перлит (сорбит) с мелкими завихренными графитными включениями. К перлитным чугунам относятся так называемые сталистые и модифицированные чугуны.

Сталистые чугуны (СЧ24, СЧ28) получают выплавкой с добавлением в шихту 20–30% стального лома; чугуны имеют пониженное содержание углерода, что обеспечивает получение более дисперсной перлитной основы с меньшим количеством графитных включений. Содержание кремния в этих чугунах должно быть достаточным для предотвращения возможности отбеливания чугуна.

Модифицированные чугуны (СЧ30, СЧ36, СЧ40, СЧ45) получают добавлением в жидкий чугун перед разливкой специальных модификаторов. Модифицирование применяют для получения в крупных отливках с различной толщиной стенок перлитной основы сokra-

плением небольшого количества изолированных пластинок графита средней величины.

14.3. АНТИФРИКЦИОННЫЕ И БЕЛЫЕ ЧУГУНЫ

Антифрикционные чугуны применяют для изготовления подшипников скольжения, втулок и других деталей, работающих при трении о металл, чаще в присутствии смазки. Эти чугуны должны обеспечивать низкое трение, то есть антифрикционность. Антифрикционность определяется формой графита и соотношением перлита и феррита в основе.

Антифрикционные чугуны с глобулярным графитом изготавливают двух марок: АЧВ-1 — с перлитной структурой и АЧВ-2 — с повышенным содержанием кремния и ферритно-перлитной структурой.

АЧВ-1 предназначен для работы в узлах трения с повышенными окружными скоростями в паре с закаленным или нормализованным валом. Чугун АЧВ-2 применяют в паре с нетермообработанным валом.

Перлитный чугун, содержащий увеличенное количество фосфора (0,3—0,5%), используют для изготовления поршневых колец. Высокая износостойкость колец обеспечивается металлической основой, состоящей из тонкого перлита и фосфидной эвтектики при наличии пластинчатого графита.

Белый чугун вследствие присутствия в нем цементита обладает высокой твердостью, хрупок и не поддается обработке резанием, поэтому имеет ограниченное применение.

Отбеленными называются чугуны, в которых поверхностные слои имеют структуру белого (или половинчатого) чугуна, а сердцевина — структуру серого чугуна.

Отбел на некоторую глубину (10—30 мм) является следствием быстрого охлаждения поверхности, возникающего в результате отливки чугуна в металлические формы (кокиль) или в песчаную форму.

Высокая твердость поверхности ($HB = 400\text{--}500$) обуславливает хорошую сопротивляемость износу. Поэтому из отбеленного чугуна изготавливают прокатные валки листовых станов, колеса, шары для мельниц.

Вследствие различной скорости охлаждения и получения разных структур отливка имеет большие внутренние напряжения, для снятия которых отливки подвергают термообработке, то есть их нагревают при $500\text{--}550\text{ }^{\circ}\text{C}$.

14.4. ВЫСОКОПРОЧНЫЕ ЧУГУНЫ

Большое значение для качества чугунов имеют форма и размер графитных включений.

Степень графитизации зависит от содержания графитизирующих примесей и скорости охлаждения, а вот размер и форма графитных включений — от этих факторов, а также от наличия в жидком чугуне центров кристаллизации, так как наличие большого числа центров кристаллизации в виде различных частичек способствует образованию структуры мелкого графита.

Для этого в жидкий чугун перед разливкой его по формам вводят небольшую добавку модификаторов. Чаще для этой цели применяют Mg (0,03—0,07%). В результате процесса кристаллизации графит принимает шаровидную форму. Шаровидный графит, имеющий минимальную поверхность, значительно меньше ослабляет металлическую основу чугуна, чем пластинчатый, не являясь активным центром концентрации напряжений.

Чугуны с шаровидным графитом имеют более высокие механические свойства, не уступающие литой углеродистой стали, сохраняя при этом хорошие литейные свойства и обрабатываемость резанием, способность гасить вибрации, высокую износостойкость.

Маркируют высокопрочные чугуны буквами ВЧ, затем следуют цифры. Цифры показывают среднее значение временного сопротивления при растяжении (кгс/мм^2): чугуны марок ВЧ50, ВЧ60, ВЧ70, ВЧ80, ВЧ100, ВЧ120 имеют перлитную металлическую основу, ВЧ45 — перлитно-ферритную, ВЧ38, ВЧ42 — ферритную.

Для указания формы графита иногда в маркировке ставят буквы ШГ (шаровидный графит) или ВГ (вермикулярный графит). Например: ВЧШГ — высокопрочный чугун с шаровидным графитом, ВЧВГ — высокопрочный чугун с вермикулярным графитом.

Для снятия внутренних напряжений, повышения механических свойств чугуны подвергают термообработке.

Отливки из высокопрочных чугунов широко используют в различных отраслях: в автопромышленности и дизелестроении — для изготовления коленчатых валов, крышек цилиндров; в тяжелом машиностроении — для изготовления многих деталей прокатных станов, кузнечно-прессового оборудования (например, для шабот-молотов, траверс-прессов, прокатных валов); в химической и нефтехимической промышленности — для изготовления корпусов насосов, вентилях и т.д.

14.5. КОВКИЕ ЧУГУНЫ

Ковким называют чугун с хлопьевидным графитом, который получается из белого чугуна путем специального графитизирующего отжига — томления. Металлическая основа ковкого чугуна — феррит, реже — перлит. Наибольшей пластичностью обладает ферритный ковкий чугун, который применяют в машиностроении.

Химический состав белого чугуна, отжигаемого на ковкий чугун, выбирают в следующих пределах: 2,2–2,8% С; 0,6–1,4% Si; $\leq 0,4\%$ Mn; $\leq 0,1\%$ S; $\leq 0,2\%$ P.

Для ускорения отжига применяют различные меры: чугун модифицируют алюминием (реже — бором, висмутом и другими элементами), повышают температуру нагрева чугуна перед разливкой, применяют перед отжигом старение, чаще в процессе нагрева до температуры отжига при 350–400 °С повышают температуру стадии графитизации, но не выше 1080 °С.

Ковкий чугун маркируют буквами КЧ и цифрами. Первые две цифры указывают предел прочности при растяжении, вторые — относительное удлинение. Отливки из ковкого чугуна применяют для деталей, работающих при ударных и вибрационных нагрузках.

Ферритные чугуны КЧ37-12, КЧ35-10 используют для изготовления деталей, испытывающих высокие статические и динамические нагрузки (картеры, ступицы, крюки, скобы), КЧ30-6, КЧ33-8 — для изготовления менее ответственных деталей (головки, хомуты, гайки, фланцы, муфты).

Твердость ферритного чугуна HB = 163.

Перлитные чугуны КЧ50-4, КЧ56-4, КЧ60-3, КЧ63-2 обладают высокой прочностью, умеренной пластичностью и хорошими антифрикционными свойствами; HB = 240–270.

Из перлитного ковкого чугуна изготавливают вилки карданных валов, втулки, муфты, тормозные колодки. Ковкий чугун применяют главным образом для изготовления тонкостенных деталей — в отличие от ВЧ, который используют для деталей большого сечения.

14.6. ЛЕГИРОВАННЫЕ ЧУГУНЫ

При легировании чугунов применяются те же элементы, что и при легировании стали (хром, никель, медь, титан, молибден и др.). Чугун с повышенным содержанием кремния (свыше 4%) и марганца (свыше 2%) относится к легированным чугунам. В зависимости от степени легирования различают низколегированные (с содержа-

нием легирующих элементов до 1–3%), среднелегированные (3–10%) и высоколегированные чугуны (свыше 10%).

Маркировка легированных чугунов начинается с буквы Ч. Последующие буквы показывают наличие легирующих элементов. Цифры обозначают последовательно среднее содержание легирующих элементов в *процентах*. Буква Ш означает, что графит в чугуне имеет шаровидную форму.

Все легирующие элементы изменяют как процесс графитизации при эвтектическом превращении, так и процесс формирования металлической основы при эвтектоидном превращении. Они увеличивают устойчивость жидкой фазы и аустенита, способствуя большей степени переохлаждения. Вследствие этого кристаллизация и формирование структуры металлической основы происходят в более благоприятных условиях для получения мелкого и среднего графита и более дисперсной основы. Правильно подбирая содержание основных и легирующих элементов, можно получить ферритную, перлитную, сорбитную, трооститную, мартенситную и аустенитную структуры металлической основы при определенных размерах, форме и распределении графита.

По химическому составу различают несколько групп легированных чугунов: хромистые, кремнистые, алюминиевые, марганцевые и никелевые, а по условиям эксплуатации — жаростойкие, жаропрочные износостойкие, коррозионностойкие и немагнитные. При этом один и тот же легирующий элемент придает чугуну одновременно несколько специальных свойств.

Хромистые чугуны применяют главным образом как жаростойкие, коррозионностойкие и износостойкие материалы. Износостойкость чугуна определяется его структурой и твердостью, большая часть высокохромистых чугунов успешно работает в условиях ударного абразивного изнашивания и истирания.

Кремнистые чугуны применяют главным образом как окалин- и коррозионностойкие материалы. Механические свойства кремнистых чугунов относительно низкие как при нормальных, так и при повышенных температурах и понижаются с увеличением содержания кремния. С целью повышения механических свойств кремнистые чугуны иногда легируют медью.

Литейные свойства низкокремнистых чугунов мало отличаются от свойств СЧ и ВЧШГ.

Алюминиевые чугуны применяют как жаростойкие и износостойкие материалы. Увеличение содержания Al до 12% приводит к непрерывному снижению прочности, которая в дальнейшем

стабилизируется. Максимальную твердость имеют чугуны, содержащие 10–17% Al. Наиболее технологичным является чугун, содержащий 19–25% Al (ЧЮ22), причем чугун с шаровидным графитом обладает повышенной прочностью и жаропрочностью.

Марганцевые чугуны применяют как немагнитные и износостойкие материалы. В марганцевых антифрикционных чугунах, как и в высоконикелевых, медленное охлаждение и отпуск способствуют выпадению большого количества карбидов и снижению легированности аустенита. В структуре антифрикционных марганцевых чугунов содержится 45–55% аустенита и 10–30% карбидов — в литом состоянии; 80–90% аустенита и 5–8% карбидов — после закалки. Именно поэтому твердость чугуна в незакаленном состоянии бывает выше, чем в закаленном (1800–2900 и 1400–1800 МПа соответственно). Эти чугуны имеют повышенную склонность к образованию усадочных раковин.

Никелевые чугуны — немагнитные, коррозионностойкие, жаропрочные и хладостойкие материалы. Прочность и твердость никелевых чугунов возрастает с увеличением содержания Ni, Cr. Аустенитный чугун с ШГ обладает высокой жаропрочностью. Дополнительное легирование повышает жаропрочность. Чугун ЧН20ДГ является жаропрочным и хладостойким материалом.

14.7. ТЕРМООБРАБОТКА ЧУГУНОВ

Термическую обработку чугунов проводят с целью снятия внутренних напряжений, возникающих при литье и вызывающих с течением времени изменение размеров и формы отливки, снижение твердости и улучшение обрабатываемости резанием, повышение механических свойств.

Различают несколько видов **отжига чугунов**.

1. Отжиг для снятия внутренних напряжений. Этому виду отжига подвергают чугуны при следующих температурах: серый чугун с пластинчатым графитом — при 500–570 °С; высокопрочный чугун с шаровидным графитом — при 550–650 °С; высоколегированный чугун (типа «кирезист») — при 620–650 °С. Скорость нагрева составляет примерно 70–100 град/ч, выдержка при температуре нагрева зависит от массы и конструкции отливки и составляет от 1 до 8 ч.

Охлаждение до 200 °С медленное, со скоростью 20–50 град/ч, что достигается охлаждением отливки вместе с печью. Далее отливки охлаждаются на воздухе.

При этом отжиге не происходит фазовых превращений, снимаются внутренние напряжения, повышается вязкость, исключается коробление и образование трещин в процессе эксплуатации.

2. Смягчающий отжиг (отжиг графитизирующий низкотемпературный) проводят для улучшения обрабатываемости резанием и повышения пластичности. Его осуществляют продолжительной выдержкой при 680–700 °С (ниже точки $A_{с1}$) или медленным охлаждением отливок при 760–700 °С. Время выдержки должно быть достаточным для полного и требуемого частичного распада эвтектоидного цементита (для серых чугунов время выдержки 1–4 ч, для ковких — до 60 ч). Охлаждение медленное для деталей сложной конфигурации.

В результате этого отжига в структуре чугунов увеличивается количество феррита.

3. Отжиг графитизирующий, в результате которого из белого чугуна получают ковкий чугун.

4. Нормализация (серого и ковкого чугуна) при температуре 850–950 °С.

Время выдержки должно быть достаточным для насыщения аустенита углеродом и в зависимости от конфигурации изделий составляет от 1 до 3 ч.

Охлаждение ускоренное, чтобы аустенит смог превратиться в перлит, чаще всего осуществляется на воздухе. Для деталей сложной формы охлаждение с температуры 600–550 °С должно быть замедленное, чтобы уменьшить величину термических напряжений.

В результате нормализации получается структура перлит + графит и повышаются прочность и износостойкость.

После нормализации для снятия внутренних напряжений применяется высокий отпуск при 650–680 °С с выдержкой 1–1,5 ч.

Закалка и отпуск чугунов. Для закалки чугун нагревают до 850–950 °С. Скорость нагрева изделий сложной формы меньше, чем изделий простой формы. Время выдержки обычно составляет от 1 до 3 ч. Охлаждение осуществляют в воде или масле. При закалке аустенит превращается в неравновесные структуры: мартенсит или троостит + графит.

После закалки проводят отпуск при температуре 200–600 °С. В результате повышаются твердость, прочность и износостойкость чугуна.

При изотермической закалке чугун нагревают так же, как и при обычной закалке, выдерживают от 10 до 90 мин и охлаждают в расплавленной соли при 200–400 °С. При этом происходит изотерми-

ческий распад аустенита с образованием структуры игольчатый троостит + графит.

В результате изотермической закалки повышаются твердость и прочность, но сохраняется пластичность.

Возможна поверхностная закалка кислородно-ацетиленовым пламенем, токами высокой частоты или в электролите. Температура нагрева — 900–1000 °С. Охлаждение — в воде, масле или масляной эмульсии. При поверхностной закалке в поверхностном слое образуются структуры: мартенсит + графит или троостмартенсит + графит. После отпуска при 200–600 °С и охлаждения на воздухе повышаются твердость, прочность и износостойкость поверхностного слоя при наличии мягкой сердцевины.

Старение чугунов. Старение применяют для стабилизации размеров отливок, предотвращения коробления и снятия внутренних напряжений.

Естественное старение осуществляют на открытом воздухе или в помещении. Изделия после литья выдерживают в течение 6–15 месяцев. При естественном старении снижение напряжений в отливках составляет 3–10%.

При вибрационном старении снижение напряжений достигает 10–15%. Во время вибрации в отливке возникают дополнительные временные напряжения, вызывающие локальные пластические деформации чугуна и таким образом повышающие стойкость к короблению.

Старение методом статической перегрузки отличается тем, что для создания дополнительных временных напряжений деталь подвергают воздействию статических внешних нагрузок. При этом методе снижение напряжений достигает 10–30%.

Старение методом термоударов (термоциклическое старение) осуществляют путем быстрого нагрева и охлаждения всей детали или отдельных ее участков. Стойкость против коробления повышается за счет пластических деформаций, вызываемых временными температурными напряжениями. Общий уровень напряжений снижается на 10–20%. Термоциклическое старение осуществляют по следующему режиму: загрузка в печь и нагрев за 3–3,5 ч до 350 °С, выдержка 2–2,5 ч, затем резкое охлаждение (на воздухе), снова поверхностный нагрев (за 1–1,5 ч) до 320 °С, выдержка 4–5 ч, охлаждение вместе с печью до 150–100 °С.

Искусственное старение осуществляют при повышенных температурах; длительность — несколько часов.

При искусственном старении отливки чугуна загружают в печь, нагретую до 100–200 °С, нагревают до температуры 550–570 °С со скоростью 30–60 град/ч, выдерживают 3–5 ч и охлаждают вместе с печью со скоростью 20–40 град/ч до температуры 150–200 °С, а затем охлаждают на воздухе. Обычно старение проводят после грубой механической обработки.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите основные виды чугунов и их свойства.
2. Какое влияние на свойства чугунов оказывают примеси?
3. В каком виде может присутствовать графит в чугунах?
4. Какие специфические свойства придает графит серому чугуну?
5. Каким образом получают модифицированный чугун?
6. Чем определяется наличие малого коэффициента трения в антифрикционных чугунах?
7. Что такое белый и отбеленный чугуны? Какова область их применения?
8. Как получают высокопрочный и ковкий чугуны?
9. Какие свойства можно получить за счет легирования и термообработки чугунов?

Раздел V

ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ

Глава 15

АЛЮМИНИЙ И ЕГО СПЛАВЫ

Металлы с плотностью менее 3 г/см^3 принадлежат к группе легких металлов. К ним относятся алюминий, магний, бериллий.

Из трех легких металлов алюминий имеет наибольшее значение, так как по объему производства занимает второе место после железа.

15.1. ХАРАКТЕРИСТИКА АЛЮМИНИЯ

Алюминий является химическим элементом III группы периодической системы элементов Д.И. Менделеева. Основные физические свойства алюминия приведены в табл. 15.1.

Таблица 15.1

Основные физические свойства алюминия

Атомный номер	13
Атомная масса	27,0
Плотность при 20 °С, г/см^3	2,7
Температура плавления, °С	660
Атомный диаметр, нм	0,28
Скрытая теплота плавления, Дж/г	405
Удельная теплопроводность при 20 °С, Вт/(м·К)	225
Температурный коэффициент линейного расширения $\times 10^6$ при 25 °С	24,3
Удельное электросопротивление при 20 °С, Ом·см $\times 10^6$	2,7
Модуль нормальной упругости E, МПа	71 000

Алюминий имеет ГЦК-решетку (мономорфен). Характерные особенности алюминия — его малая плотность, большая пластичность, высокая электропроводность (составляет 65% от электропроводности меди) и теплопроводность.

В зависимости от чистоты различают алюминий особой чистоты: А999 (99,999% Al); высокой чистоты: А95 (99,995% Al); А99 (99,99% Al); А97 (99,97% Al) и технической чистоты: А85, А8, А7, А6, А5, А0 (99,0% Al).

Технический алюминий изготавливают в виде листов, прутков, проволок и других полуфабрикатов и маркируют АД и АД1. В качестве примесей в алюминии присутствуют Fe, Si, Mn, Zn. Алюминий обладает высокой коррозионной стойкостью вследствие образования на его поверхности тонкой прочной пленки Al_2O_3 . Чем чище алюминий, тем выше коррозионная стойкость.

Алюминий легко обрабатывается давлением, удовлетворительно — резанием, сваривается всеми видами сварки. Технический алюминий (АД и АД1) применяют для изготовления элементов конструкций и деталей, не несущих нагрузки, когда требуются высокая пластичность и хорошая свариваемость, сопротивление коррозии и высокие тепло- и электропроводность. Например, из технического алюминия изготавливают различные трубопроводы, палубные надстройки морских и речных судов, кабели, электропроводы, шины, конденсаторы, фольгу, витрины, рамы.

Более широко используют сплавы алюминия.

15.2. КЛАССИФИКАЦИЯ СПЛАВОВ АЛЮМИНИЯ

Наибольшее распространение получили следующие сплавы: Al—Cu; Al—Si; Al—Mg; Al—Cu—Mg; Al—Cu—Mg—Si; Al—Mg—Si; Al—Zn—Mg—Cu. Все алюминиевые сплавы можно разделить на три группы:

- деформируемые, предназначенные для получения полуфабрикатов (листов, плит, прутков, труб), а также поковок и штамповок путем прокатки, прессования и штамповки. Маркируются буквами (Д, АК, АМ, ВД, В), после которых указывается номер сплава (Д16);
- литейные, предназначенные для фасонного литья. Маркируются буквами АЛ, после которых указывается номер сплава (АЛ2);
- получаемые методом порошковой металлургии (спеченные алюминиевые порошки — САП, спеченные алюминиевые сплавы — САС). Их иногда называют дисперсно-упрочненными композиционными сплавами на основе алюминия.

Деформируемые сплавы, в свою очередь, делятся на упрочняемые термообработкой и не упрочняемые термообработкой.

К *упрочняемым термообработкой* относятся сплавы, обладающие ограниченной растворимостью в твердом состоянии. К этой группе относятся сплавы алюминия с магнием и кремнием, алюминия с медью и магнием.

К *не упрочняемым термообработкой* относятся однофазные сплавы, состоящие из однородного твердого раствора. Эти сплавы характеризуются невысокой прочностью и высокой пластичностью.

Упрочнение таких сплавов может быть достигнуто нагартовкой. Из этой группы сплавов наибольшее распространение нашли сплавы алюминия с магнием и алюминия с марганцем.

Отличительной особенностью литейных сплавов алюминия является наличие в их структуре эвтектики, которая способствует улучшению литейных свойств. Однако количество эвтектики в структуре сплава должно быть ограничено (не более 15–20% по объему) из-за ухудшения механических и некоторых технологических свойств.

Среди литейных сплавов наибольший интерес представляют сплавы алюминия с кремнием — *силумины*. Улучшение этих сплавов достигается за счет их термообработки.

В настоящее время применяют два вида маркировки алюминиевых сплавов:

- буквенно-цифровую.
- цифровую.

15.3. ТЕРМООБРАБОТКА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Для улучшения алюминиевых сплавов применяют закалку и старение, а для устранения неравномерных структур и деформационных дефектов строения, снижающих пластичность сплавов, — отжиг.

Закалка. Закалка заключается в нагреве сплавов до температуры, при которой избыточные интерметаллидные фазы полностью или большей частью растворяются в алюминии, выдержке при этой температуре и быстром охлаждении до нормальной температуры для получения пересыщенного твердого раствора. Основной особенностью алюминиевых сплавов является малый интервал температур нагрева под закалку. Температуры для сплавов: Al–Cu–Mg (D16) — 485–505 °C; Al–Zn–Mg–Cu (B95) — 465–475 °C; Al–Cu–Mg–Si (AK6) — 515–525 °C.

Более высокие температуры вызывают пережог (оплавление по границам зерен), что приводит к образованию трещин, пузырению поверхности полуфабрикатов, снижению сопротивления коррозии, механических свойств и сопротивления хрупкому разрушению. Выдержка должна быть минимальной, обеспечивающей растворение избыточных фаз в твердом растворе.

Охлаждение при закалке следует проводить со скоростью выше критической. Под критической скоростью понимают минимальную скорость охлаждения, которая предотвращает распад пересыщенного твердого раствора. Частичный распад твердого раствора снижает механические свойства и коррозионную стойкость после старения.

Чаще для закалки применяют воду ($T = 10\text{--}40\text{ }^{\circ}\text{C}$). Прокаливаемость алюминиевых сплавов составляет 120–150 мм.

После закалки сплавы имеют сравнительно невысокую прочность и высокую пластичность.

Старение закаленных сплавов. После закалки следует старение, при котором сплав выдерживают при нормальной температуре несколько суток (естественное старение). В процессе старения происходит распад пересыщенного твердого раствора, что сопровождается упрочнением сплавов.

Структурное упрочнение. Температура рекристаллизации некоторых сплавов алюминия с марганцем, хромом, никелем, цирконием, титаном и другими переходными металлами превышает температуру закалки или деформации, поэтому после закалки и старения таких сплавов в них сохраняется нерекристаллизованная (полигонизованная) структура с высокой плотностью дислокаций, что повышает ее прочность по сравнению с рекристаллизованной структурой. Это явление получило название *структурного упрочнения*. Структурное упрочнение наиболее существенно проявляется в прессованных полуфабрикатах.

Отжиг. *Диффузионный отжиг (гомогенизация).* Этому виду отжига подвергают слитки перед обработкой давлением для устранения дендритной ликвации, которая приводит к получению неоднородного твердого раствора и выделению по границам зерен и между ветвями дендритов хрупких неравновесных эвтектических включений CuAl_2 ; Al_2CuMg (S -фаза); Mg_2Si и др. В процессе гомогенизации состав кристаллитов твердого раствора выравнивается, а интерметаллиды растворяются.

При охлаждении они выделяются в виде равномерно распределенных включений. Гомогенизация способствует получению мелкозернистой структуры в отоженных местах и уменьшает склонность к коррозии под напряжением. В результате пластичность литого сплава повышается, что позволяет уменьшить технологические отходы.

Температура гомогенизации лежит в пределах 450–520 $^{\circ}\text{C}$, выдержка составляет 4–40 ч. Охлаждение проводят на воздухе или вместе с печью.

Рекристаллизационный отжиг заключается в нагреве деформированного сплава до температур выше температуры окончания первичной рекристаллизации. Применяют для снятия наклепа и получения мелкого зерна. Температура рекристаллизованного отжига в зависимости от состава сплава колеблется от 350 до 500 $^{\circ}\text{C}$, выдержка — 0,5–2 ч. После рекристаллизационного отжига сплавов,

не упрочняемых термообработкой, скорость охлаждения выбирают произвольно. Для сплавов, упрочняемых термообработкой, скорость охлаждения до 200—250 °С должна составлять 30 град/ч. Отжиг в качестве промежуточной операции применяют при холодной деформации или между горячей и холодной деформациями.

Отжиг для разупрочнения после закалки и старения проводят при температуре 360—450 °С с выдержкой 1—2 ч. При этих температурах происходят полный распад перенасыщенного твердого раствора и коагуляция упрочняющих фаз. Скорость охлаждения не должна превышать 30 град/ч.

После отжига сплав имеет низкий предел прочности, удовлетворительную пластичность и высокую сопротивляемость коррозии под напряжением.

15.4. ДЕФОРМИРУЕМЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ, УПРОЧНЯЕМЫЕ ТЕРМООБРАБОТКОЙ

Дюралюминий (дюралюмин) — первый промышленный сплав на основе алюминия.

Дюралюминием называют сплавы системы Al—Cu—Mg, в которые дополнительно вводят марганец. Кремний и железо являются постоянными примесями.

Дюралюминий, изготавливаемый в листах, для защиты от коррозии подвергают плакированию, то есть покрытию тонким слоем алюминия высокой чистоты (не ниже 99,5%). Толщина этого слоя составляет 3—5% от толщины листа. Плакирование снижает прочность дюралюмина.

Упрочнение дюралюмина достигается закалкой и старением. Структура закаленного дюралюмина состоит из пересыщенного α -твердого раствора и нерастворимых соединений железа, которые не участвуют в термическом упрочнении и отрицательно влияют на технологическую пластичность и коррозионную стойкость. Дюралюмины после закалки подвергают естественному старению, так как оно обеспечивает получение более высокой коррозионной стойкости. Понижение температуры тормозит старение, а повышение, наоборот, увеличивает скорость процесса, но понижает пластичность и сопротивление коррозии.

Марки дюралюминов обозначают буквой Д и цифрами, которые являются условными номерами сплавов, например: Д1, Д6, Д16 и т.д. Дюралюмин повышенного качества обозначают буквой А, например: Д16А.

Буква А в начале маркировки обозначает технический алюминий (АД, АД1); после условного номера дюралюмина часто следует обозначение, характеризующее состояние сплава: М — мягкий (отожженный); Т — термически обработанный (закалка и естественное старение); Н — нагартованный; П — полунагартованный. Например: Д16М — дюралюмин отожженный, Д16Н — дюралюмин закаленный, естественно состаренный и дополнительно нагартованный.

Для повышения коррозионной стойкости дюралюмин подвергают электрохимическому оксидированию (анодированию). Дюралюмин Д16 имеет наиболее высокую прочность по сравнению с другими дюралюминами. Дюралюмины удовлетворительно обрабатываются резанием в закаленном и состаренном состоянии, хорошо свариваются точечной сваркой и не свариваются сваркой плавлением вследствие склонности к образованию трещин.

Авиали (АВ) — сплавы повышенной пластичности. По прочности они уступают дюралюминам. Авиаль удовлетворительно обрабатывается резанием (после закалки и старения) и сваривается контактной и аргонодуговой сваркой. Обладает высокой общей коррозионной стойкостью. Склонен к межкристаллической коррозии.

Авиаль закалывают от 515–525 °С с охлаждением в воде с последующим естественным старением или искусственным (при 160 °С в течение 12 ч) старением. Искусственное старение выполняется сразу же после закалки. При увеличении перерыва между временем закалки и началом искусственного старения прочность сплава после старения уменьшается. Упрочняемой фазой в авиале является Mg_2Si .

Высокопрочные сплавы. Представителями этих сплавов являются сплавы В95, В96. Наряду с медью и магнием они содержат значительное количество цинка. При увеличении содержания цинка и магния прочность сплавов повышается, а их пластичность и коррозионная стойкость понижается. Добавки марганца и хрома улучшают коррозионную стойкость. Сплавы В95, В96 закалывают с 460–470 °С в холодной или подогретой до 80–100 °С воде. Нагрев необходим для того, чтобы избежать растрескивания и коробления крупногабаритных полуфабрикатов.

Последующее искусственное старение проводят при 120–140 °С в течение 24–26 ч соответственно.

По сравнению с дюралюмином эти сплавы обладают большей чувствительностью к концентраторам напряжений и пониженной коррозионной стойкостью под напряжением. У них меньше предел выносливости и вязкость разрушения. Профили из сплава В95 зна-

чительно прочнее листов. Это результат пресс-эффекта, который обусловлен присутствием в сплаве марганца и хрома.

Сплавы обладают хорошей пластичностью в горячем состоянии и легко деформируются в холодном состоянии после отжига. Для повышения коррозионной стойкости листы из сплава В95 плакируют сплавом алюминия с 0,9–1,3% Zn. Сплав В95 хорошо обрабатывается резанием и сваривается точечной сваркой.

Сплавы В95 и В96 применяют для нагруженных конструкций, работающих длительное время при температуре меньше 100–120 °С.

Ковочные сплавы (АК). В эту группу входят сплавы, из которых изготавливают детали методами горячей обработки давлением — ковкой, штамповкой и др. Сплавы обозначают буквами АК и цифрой, обозначающей номер сплава: АК1–АК5 и т.д. Сплавы АК относятся к сплавам системы Al–Cu–Mg–Si. Они обладают хорошей пластичностью и стойки к образованию трещин при горячей пластической деформации.

Для изготовления деталей, эксплуатация которых осуществляется при температуре до 100 °С, используют сплавы АК1, АК5, АК8; примерно до 300 °С — сплавы АК3 и АК4 (их называют жаропрочными).

Сплавы АК5 используют для изготовления деталей сложной формы и средней прочности в горячем состоянии (подмоторные рамы, фитинги, крепежные детали и др.); сплав АК8 — для тяжело-нагруженных штамповочных деталей (лопасти винтов вертолетов). Сплав АК8 менее технологичен, чем сплав АК6.

Сплавы АК6 и АК8 хорошо обрабатываются резанием, удовлетворительно свариваются контактной и аргонодуговой сваркой. Они склонны к коррозии под напряжением и межкристаллитной коррозии.

Жаропрочные сплавы. Из этих сплавов изготавливают детали, работающие при температуре до 300 °С (головки цилиндров, крыльчатки, лопасти и диски осевых компрессоров турбореактивных двигателей, обшивки сверхзвуковых самолетов и др.).

Сплавы АК4-1 (системы Al–Cu–Mg–Si с добавками Fe и Ni) и Д20 (системы Al–Cu–Mn с добавками Ti и Zr) имеют более сложный состав, чем другие алюминиевые сплавы, и сохраняют высокие механические свойства при 200–300 °С.

Высокая жаропрочность сплава Д20 достигается благодаря повышенному содержанию меди, а также марганца и титана, замедляющих диффузионные процессы. Кроме того, титан задерживает процесс рекристаллизации.

Сплав Д20 закаляют с (535 ± 5) °С в воде и подвергают искусственному старению при 170–190 °С в течение 12–18 ч.

Сплав АК4-1 подвергают закалке с $(570 \pm 5)^\circ\text{C}$ и искусственному старению при $190\text{--}200^\circ\text{C}$ в течение $12\text{--}24$ ч. При температурах эксплуатации от 20 до 200°C сплав АК4-1 не имеет преимуществ перед дюралюмином Д16. Однако при $250\text{--}300^\circ\text{C}$ наряду со сплавом Д20 он является одним из наиболее прочных алюминиевых сплавов.

15.5. ДЕФОРМИРУЕМЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ, НЕ УПРОЧНЯЕМЫЕ ТЕРМООБРАБОТКОЙ

К ним относятся сплавы алюминия с марганцем или магнием, а также технический алюминий (АД, АД1), основные особенности которых — пластичность, коррозионная стойкость и хорошая свариваемость. Прочность указанных сплавов невысокая. Холодная деформация (нагартовка) позволяет увеличить ее в $1,5\text{--}2$ раза.

Магний значительно повышает прочность сплава. Сплавы системы Al—Mg легируют марганцем, который, образуя дисперсные частицы, упрочняет сплав и способствует измельчению зерен.

Рассматриваемые сплавы хорошо обрабатываются давлением (штамповкой, гибкой), хорошо свариваются и обладают высокой коррозионной стойкостью. Обработка резанием затруднена.

Сплавы алюминия с марганцем маркируют как АМц, а с магнием — АМг.

Если сплав поставляют в отожженном состоянии, то в конце обозначения марки сплава ставят букву М — мягкие (АМгМ); если степень наклепа небольшая — букву П: полунагартованные (АМгП); если наклеп значительный — букву Н (АМгН).

Алюминиевые сплавы, не подвергающиеся термообработке, применяют в сварных и крепежных соединениях, испытывающих небольшие нагрузки и требующих высокого сопротивления коррозии.

Для средненагруженных деталей и конструкций используют сплавы АМг5, АМг6 (рамы, кузова вагонов, перегородки и переборки судов, узлы подъемных кранов, изделия авиационно-космической техники).

15.6. ЛИТЕЙНЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ

Литейные сплавы используют для изготовления изделий различными методами литья: в изложницах из разных материалов по выплавляемым моделям, под давлением, а также способами прецизионного литья.

Эти сплавы должны обладать высокой жидкотекучестью, небольшой усадкой, малой склонностью к образованию горячих трещин и пористостью, сопротивлением коррозии.

Высокими литейными свойствами обладают сплавы, содержащие в своей структуре эвтектику. Эвтектика образуется во многих сплавах, в которых содержание легирующих элементов больше предельной растворимости в алюминии. В связи с этим содержание легирующих элементов в литейных сплавах выше, чем в деформируемых. Чаще применяют сплавы Al—Si; Al—Cu; Al—Mg, которые дополнительно легируют небольшим количеством меди и магния (Al—Si), марганца, никеля, хрома (Al—Cu). Для измельчения зерна, а следовательно, улучшения механических свойств, в сплав вводят модифицирующие добавки: Ti, Zr, B, V и др.

Маркировка алюминиевых литейных сплавов, содержит буквы АЛ: А — сплав алюминиевый, Л — литейный; затем следует цифра — порядковый номер сплава.

Сплавы Al—Si. Эти сплавы, получившие название *силуминов*, близки по составу к эвтектическому сплаву и поэтому отличаются высокими литейными свойствами, а отливки — большой площадью.

Наиболее распространен сплав, содержащий 10–13% Si (АЛ2), обладающий высокой коррозионной стойкостью.

Силумин АЛ2 не упрочняется термообработкой, имеет невысокие механические свойства, но из-за малого интервала кристаллизации не образует усадочной пористости. Поэтому из сплава АЛ2 изготавливают герметические отливки сложной конфигурации.

Силумин АЛ4 дополнительно легирован магнием (0,2–0,3% Mg). При этом в сплаве образуется Mg_2Si , который является эффективным упрочнителем при термообработке. Поэтому силумины АЛ4 и АЛ9 — термически упрочненные сплавы.

Средненагруженные детали из сплава АЛ4 подвергают только искусственному старению, а крупные нагруженные детали (корпуса компрессоров, блоки цилиндров двигателей) — закалке и искусственному старению. Отливки из сплава АЛ9, требующие повышенной пластичности, подвергают закалке, а для повышения прочности — закалке и старению.

Сплавы Al—Si сравнительно легко обрабатываются резанием. Их можно сваривать, используя газовую и аргонодуговую сварку.

Сплавы Al—Cu. Эти сплавы (АЛ7, АЛ19) после термообработки имеют высокие механические свойства при нормальных и повышенных температурах и хорошо обрабатываются резанием. Литейные свойства сплавов невысоки из-за большой усадки, они

склонны к образованию горячих трещин. Сплав АЛ7 используется для небольших отливок простой формы, склонен к хрупкому разрушению вследствие выделения по границам зерен грубых частиц CuAl_2 и $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$, поэтому его применяют в закаленном состоянии. Если отливок требуется повышенная прочность, то их после закалки подвергают искусственному старению при 150°C в течение 2–4 ч.

В сплаве АЛ19 кроме CuAl_2 образуются фазы $\text{Al}_{12}\text{Mn}_2\text{Cu}$ и Al_3Ti . Титан измельчает зерно. Интерметаллиды повышают жаропрочность сплава. Упрочнение сплава достигается закалкой и старением при 175°C в течение 3–5 ч. Сплавы $\text{Al}-\text{Cu}$ неустойчивы против коррозии, поэтому отливки обычно анодируют.

Сплавы $\text{Al}-\text{Mg}$ (магналии). К ним относятся, например, АЛ8 и АЛ27. Они имеют низкие литейные свойства, стойки против коррозии, имеют повышенные механические свойства и хорошо обрабатываются резанием. Добавление к сплавам АЛ8, АЛ27, которые содержат 0,5–11,5% Mg , модифицирующих присадок Ti , Zr , Be улучшает их механические свойства, а добавление бериллия к тому же уменьшает окисляемость расплава этих сплавов.

Сплавы АЛ8 и АЛ27 предназначены для отливок, работающих во влажной атмосфере (судостроение). Эти сплавы применяют после закалки от 430°C с охлаждением в масле ($40\text{--}50^\circ\text{C}$) и выдержки при температуре закалки в течение 12–20 ч. Добавление к сплавам $\text{Al}-\text{Mg}$ до 1,5% Si (сплавы АЛ13, АЛ22) улучшает литейные свойства в результате образования тройной эвтектики.

Жаропрочные сплавы. Наиболее широко применяется сплав АЛ1, из которого изготавливают поршни, головки цилиндров и другие детали, работающие при температуре $275\text{--}300^\circ\text{C}$. Это сплавы системы $\text{Al}-\text{Cu}-\text{Ni}-\text{Mg}$. Структура литого сплава АЛ1 состоит из α -твердого раствора, содержащего Cu , Mg , Ni , и избыточных фаз Al_2CuMg ; $\text{Al}_6\text{Cu}_3\text{Ni}$. Отливки применяют после закалки и кратковременного старения при 175°C .

Более жаропрочны сплавы АЛ33, АЛ19. Высокая жаропрочность обусловлена добавками Mn , Ti , Ni , Ce , Zr , образующими нерастворимые интерметаллидные фазы.

Для изготовления крупногабаритных деталей, работающих при $300\text{--}350^\circ\text{C}$, применяют сплав АЛ21. Отливки закаливают от 525°C в горячей воде и стабилизируют отпуском при 300°C .

15.7. СПЕЧЕННЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ

Широкое применение в промышленности нашел дисперсно-упрочненный композиционный материал на алюминиевой основе — *спеченная алюминиевая пудра* (САП).

Для САП характерны высокая прочность, жаропрочность, коррозионная стойкость и термическая стабильность свойств.

САП состоит из Al и Al_2O_3 . Эти сплавы получают путем холодного брикетирования алюминиевого порошка, вакуумной дегазации брикетов и их последующего спекания под давлением. Оксид алюминия не растворяется в алюминии, а, равномерно распределившись в алюминиевой матрице, тормозит движение дислокаций, в результате чего предотвращается ползучесть, уменьшается пластичность и повышается прочность сплавов.

Используют САП с содержанием от 6 до 22% Al_2O_3 .

По жаропрочности САП превосходит все алюминиевые сплавы, его используют для изготовления деталей, работающих при температурах до 500 °С, когда требуются также высокая прочность и коррозионная стойкость.

САП хорошо обрабатывается давлением, резанием, удовлетворительно сваривается. Благодаря своим свойствам САП нашел широкое применение в самолето- и судостроении, в атомных реакторах, в электрохимической и химической промышленности. Из САП изготавливают поршневые штоки, лопатки компрессоров, обмотки электродвигателей, теплообменники, вентили управляющей системы реактивных двигателей и др.

Некоторое применение нашли *спеченные алюминиевые сплавы* (САС). Чаше САС применяют, когда путем литья и обработки давлением трудно получить соответствующий сплав. Изготавливают САС с особыми физическими свойствами. Они содержат большое количество легирующих элементов, например САС1 содержит 25–30% Si; 5–7% Ni; остальное — Al; применяют для деталей приборов, работающих в паре со сталью при температуре 20–200 °С и требующих низкого коэффициента линейного расширения и малой теплопроводности.

В настоящее время используют *гранулированные алюминиевые сплавы* с высоким содержанием переходных металлов (Fe, Ni, Co, Mn, Cr, Zr, Ti, V и др.), в малой степени растворимые в алюминии. Гранулы — литые частицы диаметром 1–4 мм. Капли жидкого металла охлаждают в воде (10^3 – 10^6 град/с), что позволяет получить сильно пересыщенные твердые растворы. В процессе нагрева (400–

450 °С) при изготовлении из гранул деформированных полуфабрикатов твердый раствор распадается с выделением дисперсных частиц интерметаллидов, которые упрочняют сплав.

15.8. АЛЮМИНИЕВЫЕ ПОДШИПНИКОВЫЕ СПЛАВЫ

Основными компонентами сплавов являются Sn, Cu, Ni, Si, образующие с алюминием гетерогенные структуры.

Чем больше олова в сплаве, тем выше его антифрикционные свойства. Однако в литых сплавах содержание олова не должно превышать 10–12%, так как образующаяся грубая сетка оловянистой составляющей снижает износостойкость и сопротивление усталости при повышении температуры. В деформированных сплавах оловянистая составляющая разлагается в виде отдельных включений внутри зерен, это дает возможность увеличить содержание олова и значительно улучшить антифрикционные свойства сплава.

Сплавы АО3-1 и АО9-2 применяют для отливки монометаллических вкладышей и втулок толщиной более 10 мм. Сплавы АО20-1 и АН-2,5 предназначены для получения биметаллической ленты со сталью методом прокатки с последующей штамповкой вкладышей. Подшипники из сплава АН-2,5 можно изготавливать и отливкой.

В тяжелонагруженных скоростных подшипниках на рабочую поверхность сплавов АО3-1, АО9-2 и АН-2,5 наносится слой (0,02–0,03 мм) олова или другого мягкого металла.

Подшипники работают при нагрузке не более 200–300 кгс/мм² и окружной скорости 15–20 м/с.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. По каким признакам классифицируются алюминиевые сплавы?
2. Назовите виды термической обработки алюминиевых сплавов.
3. Перечислите основные деформируемые и литейные алюминиевые сплавы.
4. Какие легирующие элементы обеспечивают литейные свойства алюминиевых сплавов?
5. Каким образом достигаются высокие антифрикционные свойства у алюминиевых подшипниковых сплавов?

Глава 16

СПЛАВЫ НА ОСНОВЕ МЕДИ

Медь — один из первых металлов, которые человек стал применять для технических целей. Периоды использования меди и бронзы ознаменовали целые эпохи развития человеческой цивилизации — медный век и бронзовый век.

16.1. СВОЙСТВА МЕДИ

Медь относится к группе цветных металлов, наиболее широко применяемых в промышленности. Медь имеет ГЦК-решетку. Свойства меди приведены в табл. 16.1.

Таблица 16.1

Свойства меди

Атомный номер	29
Атомная масса	63,5
Плотность при 20 °С, г/см ³	8,9
Температура плавления, °С	1083
Атомный диаметр, нм	0,256
Скрытая теплота плавления, Дж/г	205
Удельная теплопроводность при 20 °С, Вт/(м·К)	387
Температурный коэффициент линейного расширения $\times 10^6$ при 25 °С	16,8
Удельное электросопротивление при 20 °С, Ом·см $\times 10^6$	1,72
Модуль нормальной упругости E, МПа	125 000

Чистая медь обладает высокой тепло- и электропроводностью, пластичностью и коррозионной стойкостью. Хорошо обрабатывается давлением, удовлетворительно — резанием. Выпускается в виде катушек, слитков, полос, лент, труб, проволоки, поковок, листов.

По тепло- и электропроводности медь занимает второе место после серебра, но из-за ее большого практического значения эти свойства меди принято считать эталоном (100%), по отношению к которому оцениваются другие металлы. Медь широко применяют для изготовления проводников электрического тока, анодов, кабелей, шин в электровакуумной и электронной технике, а также различных теплообменников. Медь имеет высокую коррозионную стойкость в пресной и морской воде, в атмосферных условиях и различных химических средах: органических кислотах, едких щелочах,

сухих газах (галогенах) и др. Медь реагирует с аммиаком, растворяется в азотной, соляной, горячей концентрированной серной кислоте, в кислых растворах хромовых солей.

Механические свойства меди зависят от ее состояния.

Холодная пластическая деформация увеличивает прочность, твердость и упругость меди, но снижает пластичность и электропроводность. Отжиг для снятия наклепа проводят при температуре 550—650 °С в восстановительной атмосфере, так как медь при нагреве легко окисляется.

В зависимости от способа получения медь может содержать различные примеси.

По характеру взаимодействия с медью примеси можно разделить на три группы:

- примеси, образующие с медью твердые растворы, — Na, Zn, Sb, Sn, Al, As, Fe, P и др. Эти примеси резко снижают электро- и теплопроводность меди, поэтому для проводников тока применяют медь марок М0 и М1, содержащую ≤0,002% Sb и As;
- примеси, не растворимые в меди, образующие в ней легкоплавкие эвтектики, которые, выделяясь по границам зерен, затрудняют обработку давлением (Pb, Bi). На электропроводность эти примеси оказывают небольшое влияние;
- примеси кислорода и серы, образующие с медью хрупкие химические соединения Cu_2O , Cu_2S , входящие в состав эвтектики.

Значительное количество изделий из меди изготавливают обработкой давлением (прессованием, волочением, прокаткой). Медные сплавы, сохраняя положительные качества меди (высокую тепло- и электропроводность, коррозионную стойкость), обладают хорошими механическими, технологическими и антифрикционными свойствами.

Для легирования медных сплавов в основном используют элементы, растворимые в меди: Zn, Sn, Al, Be, Si, Mn, Ni. Повышая прочность медных сплавов, легирующие элементы практически не снижают пластичность, а некоторые из них до определенных концентраций увеличивают ее. Высокая пластичность является отличительной особенностью медных сплавов. По технологическим свойствам медные сплавы подразделяют на *деформируемые* и *литейные*; по способности упрочняться с помощью термообработки — на *упрочняемые* и *не упрочняемые* термообработкой. По химическому составу медные сплавы подразделяются на две основные группы: *латуни* и *бронзы*.

16.2. ЛАТУНИ

Латунями называются сплавы меди с цинком.

Предельная растворимость цинка в меди составляет 39%. При большем содержании цинка образуется электронное соединение CuZn (β -фаза) с ОЦК-решеткой. При температурах 454–468 °С наступает упорядочение электронного соединения, сопровождающееся значительным повышением его твердости и хрупкости. Эту фазу обозначают β' .

В области α -твердого раствора прочность и пластичность растут. При появлении в структуре β' -фазы происходит резкое снижение пластичности, прочность продолжает повышаться при увеличении содержания цинка до 45%. При большем содержании цинка структура сплава состоит только из β' -фазы и прочность сильно уменьшается из-за высокой хрупкости. Практическое значение имеют латуни, содержащие до 45% Zn.

При содержании цинка до 39% латуни однофазны (α -латуни), до 46% — двухфазны ($(\alpha + \beta')$ -латуни).

Лучшей пластичностью обладают однофазные латуни, содержащие около 30% Zn. Однофазные латуни хорошо поддаются холодной пластической деформации, которая значительно повышает их прочность и твердость.

Двойные латуни маркируют буквой Л и числом, указывающим среднее содержание меди. Например: Л80 — латунь, содержащая 80% Cu и 20% Zn.

Двухфазные латуни нередко легируют Al, Fe, Ni, Sn, Mn, Pb и другими элементами. Такие латуни называют *многокомпонентными* или *специальными*. *Легирующие элементы и их концентрацию в составе латуни указывают в маркировке*. Например, ЛАЖ60-1-1 — это латунь с 60% Cu, легированная алюминием (А) в количестве 1% и железом (Ж) в количестве 1%; остальное — цинк. Для обозначения вида легирующих элементов используют буквы русского алфавита. Например: О — олово, Ц — цинк, Мц — марганец, Ж — железо, Ф — фосфор, Б — бериллий, Х — хром, К — кремний и т.д.

Деформируемые латуни маркируют буквой Л и цифрой, указывающей массовое содержание меди в сплаве в процентах (например: Л96, Л63). Если латунь легирована наряду с цинком другими элементами, то после буквы Л ставят условные обозначения этих элементов. Цифры после букв показывают содержание меди и последующих (согласно буквенным обозначениям) легирующих элементов, кроме

цинка (например, латунь ЛАН59-3-2 содержит $\approx 59\%$ Cu; 3% Al; 2% Ni; остальное — Zn).

Литейные латуни также маркируют буквой Л. Здесь после буквенного обозначения основного легирующего элемента (цинк) и каждого последующего (как в сталях) ставят цифру, указывающую на его среднее содержание в сплаве (например, латунь ЛЦ 23А6ЖЭМц2 содержит 23% Zn; 6% Al; 3% Fe; 2% Mn).

Все латуни по технологическому признаку подразделяют на две группы: *деформируемые*, из которых изготавливают листы, ленты, трубы, проволоку и другие полуфабрикаты, и *литейные* — для фасонного литья. Литейные латуни, как правило, содержат большое количество цинка и легирующих элементов, обладают хорошей жидкотекучестью, мало склонны к ликвации и имеют антифрикционные свойства.

Когда требуются высокая пластичность и повышенная теплопроводность и важно отсутствие склонности к коррозионному растрескиванию, применяют α -латуни с высоким содержанием меди. Латуни, содержащие 90% меди и более, называются *томпак* (Л96), 80 – 90% Cu — *полутомпак* (Л90, Л80). Латунь, содержащая 70 – 68% Cu, называется *патронная* или *гильзовая*, так как в артиллерийском производстве ее с давних пор применяют для изготовления гильз.

Для уменьшения твердости перед обработкой давлением и получения в полуфабрикатах требуемых свойств латуни подвергают рекристаллизационному отжигу при 600 – 700 °С. Для получения мелкого зерна перед глубокой вытяжкой полосы и ленты отжигают при более низкой температуре (450 – 500 °С).

Литейные латуни содержат большее количество специальных присадок, улучшающих их литейные свойства. Эти латуни отличаются и лучшей коррозионной стойкостью.

16.3. БРОНЗЫ

Бронзами называют сплавы меди со всеми элементами, кроме цинка. Цинк не является основной добавкой, но может присутствовать в составе бронзы только наряду с другими элементами.

Название бронзам дают по основным легирующим элементам: оловянные, алюминиевые, бериллиевые, кремнистые и другие бронзы.

Бронзы обладают хорошими литейными свойствами, их усадка в три раза меньше, чем у других сплавов. Некоторые бронзы имеют достаточно высокую пластичность и хорошо обрабатываются давле-

нием и резанием. Большинство бронз имеют высокую коррозионную стойкость. Бронзы широко используют как антифрикционные сплавы.

Деформируемые бронзы маркируют буквосочетанием «Бр», далее последовательно указывают легирующие элементы и в конце — их содержание в сплаве. Например, БрОФб-0,4 содержит 6% Sn; 0,4% P; остальное — Cu.

Деформируемые бронзы изготавливают в виде прутков, лент и проволоки в нагартованном (твердом) и отожженном (мягком) состояниях. Эти бронзы чаще предназначаются для изготовления пружин и пружинных деталей, применяемых в различных отраслях промышленности. Структура деформируемых оловянных бронз — α -твердый раствор.

Литейные бронзы также маркируются буквами «Бр», а после этих букв маркировка производится аналогично литейным латуням. Например, БрОЗЦ12С5 содержит 3% Sn; 12% Zn; 5% Pb; остальное — Cu.

Литейные бронзы содержат более 6% Sn и большое количество легирующих добавок по сравнению с деформируемыми: цинка, фосфора, свинца. Они имеют двухфазную структуру ($\alpha + \delta$).

Оловянные бронзы обладают высокой коррозионной и химической стойкостью. Они не корродируют в атмосферных условиях, пресной и морской воде. Широко применяются для пароводяной арматуры, работающей под давлением; хорошо обрабатываются резанием, паяются, но хуже свариваются.

Алюминиевые бронзы отличаются высокими механическими, антикоррозионными и антифрикционными свойствами.

Они хорошо сопротивляются коррозии в морской воде и тропической атмосфере, имеют высокие механические и технологические свойства. Однофазные бронзы, обладающие высокой пластичностью, применяют для глубокой штамповки. Двухфазные бронзы подвергают горячей деформации или применяют в виде фасонного литья.

Высокими механическими, антикоррозионными и технологическими свойствами обладают алюминиевые бронзы, легированные вместо никеля более дешевым марганцем (БрАМцЖ 10-3-1).

Бериллиевые бронзы отличаются чрезвычайно высокими пределами упругости и прочности, твердостью и коррозионной стойкостью в сочетании с повышенным сопротивлением усталости, ползучести, износу. Эти бронзы относятся к сплавам, упрочняемым термообработкой.

Они устойчиво работают при температурах до 310–340 °С, при 500 °С имеют приблизительно такую же прочность, как оловянные и алюминиевые бронзы, обладают высокой тепло- и электропроводностью. Бериллиевые бронзы хорошо обрабатываются резанием и свариваются точечной и шовной сваркой. Широкий температурный интервал кристаллизации затрудняет сварку плавлением.

Кремнистые бронзы характеризуются хорошими механическими, пружинящими и антифрикционными свойствами, а также высокой коррозионной стойкостью. Они являются заменителями дорогостоящих оловянных и бериллиевых бронз. Однофазная структура твердого раствора обеспечивает кремнистым бронзам удовлетворительную пластичность и обрабатываемость давлением. Они свариваются, паяются, удовлетворительно обрабатываются резанием.

Из кремнистых бронз изготавливают главным образом ленты, полосы, прутки, проволоку. Для фасонных отливок они применяются редко. Их используют при производстве пружин, мембран, пружинящих деталей приборов и радиооборудования, работающих при температурах до 250 °С, а также в агрессивных средах (пресной и морской воде).

Свинцовые бронзы выгодно сочетают в себе хорошие антифрикционные свойства с высокой теплопроводностью. Кроме того, они хорошо воспринимают ударные и усталостные нагрузки. В связи с этим их применяют для ответственных высоконагруженных подшипников, работающих на больших скоростях (подшипники авиационных двигателей, машинных турбин).

Наибольшее применение имеют бронзы, содержащие 25–30% Рв.

Марганцевые бронзы отличаются высокой коррозионной стойкостью и повышенной жаропрочностью. Эти сплавы содержат от 5 до 12% Мп. По диаграмме состояния Cu–Мп они имеют однофазную структуру γ-твердого раствора марганца в меди, что обеспечивает им хорошую обрабатываемость давлением. Повышенная жаропрочность этих бронз объясняется тем, что марганец увеличивает температуру рекристаллизации меди.

Из двойных марганцевых бронз наибольшее промышленное применение имеет бронза БрМц5. Ее прочность мало меняется при нагреве до 400 °С. Бронзу БрМц5 выпускают в виде деформированных полуфабрикатов (поковок, листов, лент), которые применяют для изготовления деталей, работающих при повышенных температурах. Небольшой температурный интервал кристалли-

зации обеспечивает бронзе БрМц5 хорошую жидкотекучесть, что позволяет изготавливать из нее фасонные отливки (арматуру паровых котлов).

Для придания антифрикционных свойств в марганцевые бронзы вводят свинец, для повышения прочности и твердости — никель, для улучшения литейных свойств — кремний и алюминий.

16.4. МЕДНО-НИКЕЛЕВЫЕ СПЛАВЫ

Легирование меди никелем значительно повышает ее механические свойства, коррозионную стойкость, термоэлектрические характеристики. Промышленные медно-никелевые сплавы можно условно разделить на две группы: *конструкционные* и *электротехнические*. К первой группе относятся коррозионностойкие и высокопрочные сплавы — мельхиоры, нейзильберы и кунiali. В качестве дополнительных легирующих элементов в них добавляют марганец, алюминий, цинк, железо, кобальт, свинец, а также хром, церий, магний, литий.

Мельхиоры имеют высокую коррозионную стойкость в различных средах — в пресной и морской воде, органических кислотах, растворах солей, в атмосферных условиях. Добавки железа и марганца увеличивают стойкость медно-никелевых сплавов против коррозии. Являясь твердыми растворами, они обрабатываются давлением в горячем и холодном состоянии.

Нейзильберы — сплавы на основе меди, в которых основными легирующими элементами являются никель и цинк. Они представляют собой твердые растворы на основе меди. Легирование цинком приводит к повышению механических свойств медно-никелевых сплавов, приданию им красивого серебристого цвета и их удешевлению. Нейзильберы отличаются высокой коррозионной стойкостью, не окисляются на воздухе, сравнительно устойчивы в органических кислотах и растворах солей; обрабатываются давлением в горячем и холодном состояниях. Небольшое количество свинца вводят для улучшения обработки резанием.

Сплавы на основе тройной системы Cu—Ni—Al называют *куниалями*. Они отличаются высокими механическими и упругими свойствами, коррозионной стойкостью, устойчивостью при низких температурах.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как называют основные группы сплавов меди?
2. Какие основные легирующие элементы используют в латунях? Как они влияют на свойства сплавов?
3. Что такое бронзы? Каковы их разновидности?
4. Как маркируются сплавы меди?

Глава 17

СПЛАВЫ НА ОСНОВЕ ТИТАНА

17.1. СВОЙСТВА ТИТАНА

Титан — металл серебристо-белого цвета — является одним из наиболее распространенных элементов земной коры: занимает четвертое место, уступая только алюминию, железу и магнию.

Титан существует в двух полиморфных модификациях: α -титан, имеющий ГПУ-решетку при температурах ниже 885 °С, и β -титан с ОЦК-решеткой, устойчивый при температурах выше 885 °С (табл. 17.1) Отличительные особенности титана — высокие механические свойства, малая плотность, высокая удельная прочность и хорошая коррозионная стойкость.

Таблица 17.1

Свойства титана

Атомный номер	22
Атомная масса	47,0
Плотность при 20 °С, г/см ³	4,5
Температура плавления, °С	1668
Атомный диаметр, нм	$d_{\alpha} = 0,289$
	$d_{\beta} = 0,286$
Скрытая теплота плавления, Дж/г	358
Удельная теплопроводность при 20 °С, Вт/(м·К)	18,85
Температурный коэффициент линейного расширения $\times 10^6$ при 25 °С	8,15
Удельное электросопротивление при 20 °С, Ом·см $\times 10^6$	45
Модуль нормальной упругости E , МПа	112 000

Низкий модуль упругости титана, почти в 2 раза меньший, чем у железа и никеля, затрудняет изготовление жестких конструкций.

Механические свойства титана характеризуются хорошим сочетанием прочности и пластичности.

Титан обладает высокой прочностью не только при комнатной температуре, но и в условиях глубокого холода. При этом, если содержание водорода мало, он сохраняет высокую пластичность.

Пластическая деформация значительно повышает прочность титана. При степени деформации 60–70% прочность увеличивается в 2 раза. Для снятия наклепа проводят рекристаллизационный отжиг при температуре 650–750 °С.

Титан обладает высокой коррозионной и химической стойкостью благодаря защитной оксидной пленке на его поверхности. Он не корродирует в пресной и морской воде, не растворяется во многих органических и минеральных кислотах, в царской водке и других агрессивных средах. При повышении температуры, особенно под напряжением, коррозионная стойкость титана ухудшается.

При повышении температуры титан активно поглощает газы: начиная с 50–70 °С — водород, свыше 400–500 °С — кислород и с 600–700 °С — азот, оксид углерода и углекислый газ. Титан имеет низкую жаростойкость. Высокая химическая активность расплавленного титана требует применения при плавке и дуговой сварке вакуума или атмосферы инертных газов.

Технический титан хорошо обрабатывается давлением при комнатной и повышенной температурах. Из него изготавливают все виды прессованного и катаного полуфабриката: листы, трубы, проволоки, поковки и др. Титан хорошо сваривается аргонодуговой и точечной сваркой. Сварной шов обладает хорошим сочетанием прочности.

Слитки титана можно обрабатывать давлением всеми известными способами: ковать, прокатывать, штамповать и т.д. Слитки титана перед обработкой давлением рекомендуется нагревать ступенчато: сначала длительный нагрев при температуре 700–750 °С, затем кратковременный нагрев при 850–1000 °С. Время выдержки при высокой температуре должно составлять не более 30 сек на 1 мм сечения. Из-за опасности загрязнения титана газами нагрев под горячую обработку и сам процесс обработки следует производить в возможно минимальное время.

Титан после холодного деформирования отжигают при температуре 650–700 °С с выдержкой от 15 мин до 1 ч в зависимости от толщины полуфабриката.

Механические свойства титана сильно зависят от наличия примесей.

Азот, кислород, водород, углерод являются вредными примесями титана.

Титан плохо обрабатывается резанием, налипает на инструмент и быстро его изнашивает. Для обработки титана требуются инструменты из быстрорежущих сталей и твердых сплавов, малые скорости резания при большой подаче и глубине резания, интенсивное охлаждение.

17.2. ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТИТАНОВЫЕ СПЛАВЫ

Титановые сплавы получили широкое применение в авиации, ракетной технике, судостроении, химической и других отраслях промышленности.

По характеру обработки металла сплавы титана делятся на *деформируемые* и *литейные*, по механическим свойствам — на сплавы *нормальной прочности*, *высокопрочные*, *жаропрочные*, *повышенной пластичности*, по способности упрочняться с помощью термообработки — на упрочняемые и не упрочняемые термообработкой.

Деформируемые сплавы. *Сплавы с α -структурой* (BT5, BT5-1) характеризуются средней прочностью при комнатной температуре, высокими механическими свойствами при криогенных температурах, хорошей жаропрочностью, сопротивлением ползучести и жаростойкостью. Сплавы имеют высокую термическую стабильность и обладают отличной свариваемостью и коррозионной стойкостью. Обрабатываемость резанием удовлетворительная.

Недостатки этих сплавов: отсутствие способности упрочняться термообработкой и низкая технологическая пластичность. Сплавы с оловом более технологичны и жаростойки, обладают высоким сопротивлением ползучести. Это самые дорогие из α -сплавов. В горячем состоянии сплавы куят, прокатывают и штампуют. Их поставляют в виде прутков, сортового проката, поковок, труб и проволоки.

Сплав BT5 предназначен для изготовления деталей, работающих при температурах до 400 °С.

Сплав BT5-1 имеет рабочую температуру до 500 °С.

К группе α -сплавов относятся чистый титан, а также псевдо- α -сплавы, имеющие небольшое количество β -фазы (1–5%) вследствие дополнительного легирования марганцем (OT4, BT4 и др.). Сохраняя достоинства α -сплавов, последние благодаря наличию β -фазы обладают высокой технологической пластичностью.

Сплавы OT4-1, OT4, содержащие меньше алюминия (соответственно 2–3%), обрабатывают давлением в холодном состоянии и только при изготовлении сложных деталей подогревают до 500–700 °С. Сплавы с большим содержанием алюминия (BT4 и OT4-2) при обработке давлением требуют подогрева до 600–800 °С.

Недостатком сплавов этой группы является склонность к водородной хрупкости, поэтому допустимое содержание водорода колеблется в пределах 0,02–0,05%.

Двухфазные ($\alpha + \beta$)-сплавы (BT3-1, BT6, BT8, BT14 и др.) обладают лучшим сочетанием технологических и механических свойств. Их упрочняют термообработкой — закалкой и старением. В отожженном и закаленном состояниях они имеют хорошую пластичность, а после закалки и старения — высокую прочность при комнатной и повышенной температурах. При этом чем больше β -фазы содержится в структуре сплава, тем он сильнее упрочняется при термообработке.

Сплавы BT14, BT15, BT16 являются особо высокопрочными. Большое количество β -фазы в этих сплавах объясняется высоким содержанием ванадия, молибдена, хрома.

Сплавы BT3-1, BT8 и BT9 являются жаропрочными. В этих сплавах присутствует алюминий. Алюминий значительно упрочняет α -фазу при комнатных и повышенных температурах и повышает термическую стабильность β -фазы. Алюминий снижает плотность ($\alpha + \beta$)-сплавов, несмотря на присутствие в этих сплавах более тяжелых β -стабилизаторов.

Двухфазные сплавы удовлетворительно обрабатываются резанием и свариваются. После сварки требуется отжиг для повышения пластичности сварного шва. Сплавы ($\alpha + \beta$) куется, штампуются и прокатываются легче, чем сплавы с α - или β -структурой. Их поставляют в виде поковок, штамповок, прутков, листов, лент.

Однофазные β -сплавы не имеют промышленного применения. Они дороги, обладают пониженной удельной прочностью.

В настоящее время применяются так называемые псевдо- β -сплавы (BT15). В равновесном состоянии сплав BT15 имеет преимущественно β -структуру с небольшим количеством α -фазы. Этот сплав имеет небольшую плотность (4,8 г/см³) и высокую удельную прочность, удовлетворительно обрабатывается резанием.

Недостатки сплава BT15 — пониженная пластичность сварных швов и низкая термостабильность. Поставляют в виде листов, полос, прутков, поковок. Рекомендуются для длительной работы при температуре до 350 °С.

Литейные сплавы. Титановые сплавы имеют хорошие литейные свойства. Небольшой температурный интервал кристаллизации обеспечивает им высокую жидкотекучесть и хорошую плотность отливки. Они обладают малой склонностью к образованию горячих трещин и небольшой линейной усадкой (1%). Объемная усадка составляет около 3%.

Недостатками литейных титановых сплавов являются большая склонность к поглощению газов и высокая активность при взаимо-

действию со всеми формовочными материалами. Поэтому их плавку и разливку ведут в вакууме или в среде нейтральных газов. Для получения крупных фасонных отливок (до 300—500 кг) используют чугунные и стальные формы, мелкие детали отливают в оболочковые формы, изготовленные из специальных смесей.

Для фасонного литья применяют сплавы, аналогичные по химическому составу некоторым деформируемым (ВТ5Л, ВТ6Л, ВТ9Л, ВТ14Л), а также специальные литейные сплавы (ВТ20Л, ВТ21Л, ВТ35).

Литейные сплавы обладают более низкими механическими свойствами, чем соответствующие деформируемые. Упрочняющая термообработка резко снижает пластичность литейных сплавов и поэтому не применяется.

Сплав ВТ5Л — самый дешевый и распространенный, обладает хорошими литейными свойствами, достаточно вязок и пластичен, но прочность его невысока.

Сплав ВТ35Л — наиболее прочный из промышленных сплавов. Литейные титановые сплавы применяют для изготовления трубных заготовок и различных фасонных отливок.

Порошковые титановые сплавы. Высокая стоимость изготовления и трудность механической обработки сплавов на основе титана являются серьезным препятствием на пути их широкого применения. Методы порошковой технологии позволяют повысить коэффициент использования металла путем уменьшения отходов при механической обработке.

Получение порошков из сплавов на основе титана представляется сложной проблемой вследствие вредного влияния различных примесей. Высокая химическая активность расплавленного титана делает невозможным применение большинства огнеупоров в качестве материалов для тиглей. Поэтому используют методы дуговой плавки с вращающимся анодом и неподвижным вольфрамовым катодом, электроплазменной плавки, плавки в вакууме и т.п.

17.3. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Титановые сплавы в зависимости от их состава и назначения можно подвергать отжигу, закалке, старению и химико-термической обработке. Чаще титановые сплавы подвергают отжигу. Отжиг проводят главным образом после холодной деформации для снятия наклепа. Температура отжига должна быть выше температуры рекристаллизации (700—800 °С). Температура рекристаллизации титана

в зависимости от его чистоты и степени предшествующей деформации лежит в интервале от 400 до 600 °С. Легирующие элементы повышают температуру рекристаллизации титана. Тонколистовой прокат рекомендуется отжигать в вакууме, чтобы предотвратить насыщение газами и охрупчивание.

Для повышения износостойкости титановые сплавы подвергают азотированию. Лучшие результаты дает азотирование в среде сухого азота. Оно повышает поверхностную твердость, износостойкость, жаропрочность, жаростойкость, тогда как азотирование в аммиаке способствует охрупчиванию титановых сплавов вследствие насыщения водородом. Азотирование проводят при 850–890 °С в течение 10–50 ч. При этом на поверхности образуются тонкий нитридный слой и обогащенный α -твердый раствор. Толщина нитридного слоя составляет 0,06–0,2 мм, $HV = 1200–1500$. Глубина обогащенного азотом слоя в твердом растворе равна 0,1–0,15 мм, $HV = 700–900$. Для уменьшения хрупкости азотированного слоя рекомендуется проводить вакуумный отжиг (при 800–900 °С).

Для повышения жаростойкости титановые сплавы подвергают силицированию и другим видам диффузионной металлизации.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите отличительные свойства титановых сплавов и области их применения в технике.
2. Перечислите деформируемые титановые сплавы и их основные характеристики.
3. Какие титановые сплавы обладают хорошими литейными свойствами?
4. Какие проблемы возникают при получении порошковых титановых сплавов?
5. Какие существуют виды термической обработки титановых сплавов?

Глава 18

СПЛАВЫ НА ОСНОВЕ МАГНИЯ

18.1. СВОЙСТВА МАГНИЯ

Магний — металл серебристо-белого цвета, мономорфен. Кристаллизуется в плотноупакованной гексагональной решетке. Свойства магния приведены в табл. 18.1.

Таблица 18.1

Основные физические свойств магния

Атомный номер	12
Атомная масса	24,3
Плотность при 20 °С, г/см ³	1,74
Температура плавления, °С	651
Атомный диаметр, нм	0,32
Скрытая теплота плавления, Дж/г	293
Удельная теплопроводность при 20 °С, Вт/(м·К)	1391
Температурный коэффициент линейного расширения × 10 ⁶ при 25 °С	26,0
Удельное электросопротивление при 20 °С, Ом·см × 10 ⁶	4,5
Модуль нормальной упругости E, МПа	45 000

Магний и его сплавы отличаются низкой плотностью, хорошей обрабатываемостью резанием и способностью воспринимать ударные нагрузки. В зависимости от химического состава магний выпускается трех марок: Мг96 (99,96% Mg); Мг95 (99,95% Mg); Мг90 (99,90% Mg).

В производстве выпускаются магний повышенной (99,99% Mg) и высокой (99,9999% Mg) чистоты, а также гранулированный магний.

Магний обладает низкой коррозионной и химической стойкостью. Он относительно устойчив против коррозии лишь в сухой атмосфере, усиленно корродирует в пресной и морской воде, разрушается многими кислотами и растворами солей. Примеси Si, Fe, Ni, Cu понижают коррозионную стойкость магния. При повышении температуры он интенсивно окисляется и легко самовоспламеняется, особенно в виде порошка или мелкой стружки. Поэтому при использовании магния и его сплавов, особенно при разливке, следует принимать меры против его окисления и воспламенения.

Низкая пластичность магния является результатом малого числа плоскостей скольжения в гексагональной решетке. Повышение тем-

пературы приводит к появлению новых плоскостей скольжения и двойникования и к увеличению пластичности. Обработку магния давлением проводят при температурах 350–450 °С в состоянии наибольшей пластичности.

Низкие свойства исключают возможность применения чистого магния как конструкционного материала. Технически чистый магний применим для пиротехнических целей, в химической промышленности — для синтеза органических препаратов, в металлургии — при производстве различных металлов и сплавов — как раскислитель и модификатор, восстановитель и легирующий элемент.

18.2. ПРОМЫШЛЕННЫЕ МАГНИЕВЫЕ СПЛАВЫ

Промышленные магниевые сплавы принято делить на *деформируемые* — для получения полуфабрикатов и изделий путем пластической деформации — и *литейные* — для получения деталей методом фасонного литья. Первые маркируются буквами МА, вторые — МЛ. По применению их классифицируют на конструкционные и со специальными свойствами. По механическим свойствам — на *сплавы невысокой и средней прочности, высокопрочные и жаропрочные*. По склонности к упрочнению с помощью термообработки — на *сплавы упрочняемые и не упрочняемые термообработкой*.

Деформируемые сплавы. Сплав МА1 повышенной прочности имеет структуру твердого раствора и небольшое количество малых включений β-фазы. Сплав отличается относительно высокой коррозионной стойкостью и хорошей свариваемостью, имеет удовлетворительную пластичность при комнатной и хорошую — при повышенных температурах. В горячем состоянии из него изготавливают все виды полуфабрикатов: листы, профили, штампованные заготовки. Сплав МА1 применяют для изготовления малонагруженных деталей: сварных масло- и бензобаков, арматуры топливных и масляных систем.

Сплавы МА2, МА8 — сплавы средней прочности. Сплав МА8 отличается от сплава МА1 наличием 0,15–0,35% цинка, который улучшает его механические свойства за счет дополнительного легирования твердого раствора и образования тонкодисперсной фазы Mg_2Zn . При этом сохраняются основные преимущества сплава МА1: высокая коррозионная стойкость и хорошая свариваемость. Сплав МА8 применяют в отожженном состоянии для изготовления средненагруженных деталей. Наличие цинка и алюминия в сплаве МА2

обеспечивает ему хорошую пластичность, что позволяет изготавливать из него кованные и штампованные детали сложной формы. Из-за низкого содержания алюминия в сплаве (и поэтому небольшого количества фазы Mg_4Al_3 в его структуре) сплав МА2 мало упрочняется при закалке и старении. Сплав применяется в горячепрессованном или отожженном состояниях.

Высокопрочные сплавы МА5, МА14, МА19 подвергают упрочняющей термообработке. Сплав МА5 с повышенным содержанием алюминия упрочняется при старении благодаря фазе Mg_4Al_3 , а сплавы МА14 и МА19 — за счет фазы $MgZn$. Более высокий предел прочности и особенно предел текучести при хорошей пластичности сплавов МА14 и МА19 объясняются модифицирующим действием циркония, который также благоприятно влияет и на коррозионную стойкость.

К *жаропрочным* относятся сплавы, содержащие церий, неодим, торий, — МА11, МА12, МА19. Высокие механические свойства при повышенных температурах эти сплавы имеют благодаря наличию дисперсных включений фаз Mg_9Nd , Mg_9Ce и Mg_5Th , не склонных к коагуляции при высоких температурах. Эти сплавы характеризуются высоким пределом ползучести, длительной прочностью и твердостью при повышенных температурах, хорошо деформируются, не склонны к коррозии под напряжением, удовлетворительно свариваются. Наибольшей прочностью обладают сплавы, содержащие торий, — МА13 и ВМД-1. Их применяют в ракетной технике для изготовления деталей, работающих длительно при температурах до 350 °С и кратковременно — при температурах до 400 °С (корпуса ракет, обтекатели, корпуса насосов, стабилизаторы и др.).

Литейные сплавы. Сплав *средней прочности МЛ3* обладает хорошей герметичностью. По химическому составу он близок к деформируемому сплаву МА2, имеет аналогичную структуру твердого раствора. Упрочнение при термообработке очень незначительно из-за малого количества γ -фазы. Сплав применяют для изготовления средненагруженных деталей простой формы повышенной герметичности.

Высокопрочный сплав МЛ5 отличается от сплава МЛ3 повышенным содержанием алюминия, а следовательно, и большим количеством упрочняющей γ -фазы. При неравновесной кристаллизации в структуре сплава появляется эвтектика. Среди магниевых сплавов МЛ5 обладает лучшими литейными свойствами. Большое количество выделенной γ -фазы по границам зерен твердого раствора делает сплав хрупким, поэтому он подвергается гомогенизации при 420 °С. Старение мало повышает предел прочности, но значительно увеличивает предел текучести сплава МЛ5.

Сплав МЛ12 имеет более высокие механические свойства при комнатной и повышенных температурах, а также хорошие литейные свойства; высокая коррозионная стойкость обеспечивается цирконием.

Сплавы МЛ5 и МЛ12 применяют для изготовления высоконагруженных деталей самолетов и авиадвигателей.

Цирконий значительно измельчает крупнозернистую структуру отливок, а также благоприятно влияет на свойства твердого раствора. С этой целью цирконий вводят и в жаропрочные литейные магниевые сплавы.

Для защиты от коррозии изделия из магниевых сплавов подвергают оксидированию с последующим нанесением лакокрасочных покрытий.

Сверхлегкие сплавы (магний-литиевые сплавы). Особенности сверхлегких сплавов являются низкая плотность (1,35–1,6 г/см³); повышенная пластичность и обрабатываемость давлением при температурах, значительно более низких по сравнению с обычными магниевыми сплавами; высокая удельная прочность и высокий предел текучести при сжатии; отсутствие чувствительности к надreau; высокая теплоемкость; хорошие механические свойства при криогенных температурах.

Магний-литиевые сплавы могут быть также использованы для создания легких композиционных материалов. Например, магний-литиевый сплав, армированный проволокой из стали У8А, имеет $\sigma_{\text{в}} = 600$ МПа, модуль упругости 64 ГПа при плотности 2,4 г/см³.

Сплавы с особыми физическими и химическими свойствами. Сплав МА18 применяют для изготовления малонагруженных деталей, работающих при температурах –250 — +60 °С, когда требуются высокая жесткость и малая масса. Сплав МА21 применяют для изготовления средненагруженных деталей, работающих при температуре до 125 °С и при криогенных температурах, когда требуются высокая жесткость и повышенная прочность при сжатии. Сплав МА17 находит применение в радиотехнической промышленности для изготовления звукопроводов ультразвуковых линий задержки.

Сплав МЦИ предназначен для литья деталей, работающих в условиях воздействия вибрационных нагрузок. Демпфирующая способность сплава МЦИ в несколько десятков раз выше, чем магниевых сплавов, используемых в качестве конструкционных материалов. Использование сплава МЦИ в конструкциях, подвергающихся вибрациям, позволяет уменьшить массу, увеличить надежность и срок службы изделий, а также существенно снизить шум.

Сплав хорошо сваривается аргонодуговой сваркой, хорошо обрабатывается резанием и обладает хорошей коррозионной стойкостью.

Термомеханическая обработка магниевых сплавов является одним из методов повышения прочности стареющих деформируемых магниевых сплавов. В практике используют три вида ТМО: низкотемпературную (НТМО), высокотемпературную (ВТМО) и комбинированную (КТМО).

При НТМО деформацию осуществляют в температурной области ниже порога рекристаллизации. Она заключается в закалке с температуры твердого раствора, холодной (или теплой) деформации (до 10–15%) с последующим старением. ВТМО — нагрев до температуры образования пересыщенного твердого раствора, горячая пластическая деформация и старение. КТМО — нагрев при температуре 490–530 °С (для сплава МАИ) в течение 2 ч, подстуживание на воздухе до 300–350 °С, деформирование при этой температуре (50–90%), деформация без нагрева (5–10%), последующее искусственное старение при 175 °С в течение 2,5 ч. Полученное упрочнение сохраняется до 300 °С.

Дисперсно-упрочненные композиционные материалы (ДКМ) на основе магния. Незначительная растворимость кислорода в магнии позволяет упрочнять его оксидами. Наибольший эффект достигается при введении оксида магния MgO в количестве до 1%. Дальнейшее повышение содержания оксида практически не меняет временное сопротивление, но существенно снижает пластичность ДКМ. ДКМ Mg–MgO обладает низкой плотностью, высокой длительной прочностью и высоким сопротивлением ползучести при нагреве. Применение этих материалов ограничено низкой коррозионной стойкостью в морской воде, а также на воздухе при температурах выше 400 °С. Наиболее перспективно применение ДКМ на основе магния в авиации, ракетной и ядерной технике в качестве конструкционного материала деталей корпусных изделий минимальной массы и повышенной прочности.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите область применения магниевых сплавов. Какими их свойствами это обусловлено?
2. Какие существуют деформируемые магниевые сплавы?
3. Благодаря каким фазам подвергаются термической обработке высокопрочные магниевые сплавы?
4. Как повышают прочность магниевых сплавов?

Глава 19

СПЛАВЫ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ, БЕРИЛЛИЯ И СВИНЦА

19.1. НИКЕЛЬ И ЕГО СПЛАВЫ

Никель — металл серебристо-белого цвета с желтоватым оттенком, мономорфен. Кристаллическая решетка — ГЦК. При температуре порядка 360 °С никель ферромагнитен. Магнитное превращение сопровождается изменением некоторых свойств никеля. Свойства никеля приведены в табл. 19.1.

Таблица 19.1

Основные физические свойства никеля

Атомный номер	28
Относительная атомная масса	58,69
Плотность, г/см ³	8,9
Температура плавления, °С	1455
Теплопроводность, кал/(см·град·с):	
при 20 °С	0,14
при 100 °С	0,20
при 300 °С	0,15
при 500 °С	0,15
Коэффициент линейного расширения, 1/град:	
от 0 до 300 °С	$16,6 \cdot 10^{-6}$
от 0 до 600 °С	$17,8 \cdot 10^{-6}$
Удельное электросопротивление, Ом·см	$7,3 \cdot 10^6$
Модуль упругости E, МПа	$230 \cdot 10^3$

Механические свойства никеля. Механические свойства никеля изменяются с температурой.

При деформации никель испытывает наклеп, и его прочность может быть доведена до 900–850 МПа.

Рекристаллизация холоднодеформируемого никеля начинается с температуры около 500 °С. Поэтому при повышенных температурах происходит его значительное разупрочнение.

Многие элементы образуют с никелем сплавы — твердые растворы, характеризующиеся хорошим комплексом механических и физических свойств.

Никель обладает весьма высокой коррозионной стойкостью. В атмосфере воздуха скорость коррозии никеля составляет 0,0025–0,025 мм/год.

Сплавы никеля. Чистый никель имеет низкую длительную прочность. Повышения свойств достигают путем комплексного легирования, в результате которого образуются многофазные сплавы, отвечающие современным требованиям машиностроения.

Никелевые сплавы используют в деформированном и литом состояниях. По структуре эти сплавы разделяют на гомогенные (нихромы, инконели) и гетерогенные (нимоники). Общим для всех сплавов на основе никеля является минимальное содержание углерода (0,06–0,12%).

Широко применяются сплавы никеля с медью, которые образуют между собой непрерывный ряд твердых растворов. В качестве такого сплава можно назвать сплав, содержащий 67–69% Ni; 28% Cu; 1,5–2,5% Fe и 1–2% Mn. Этот сплав, известный под названием монель-металла, характеризуется очень высокой прочностью и пластичностью, обладает хорошими антикоррозионными свойствами. Монель-металл широко используют в нефтехимическом аппаратостроении. Однако высокую коррозионную стойкость этот сплав имеет лишь тогда, когда монель-металл работает без контакта с другими металлами или сплавами.

Жаропрочные сплавы на никелевой основе. Большую группу сплавов на никелевой основе применяют для изготовления деталей, работающих при температурах 700–980 °С. При более высоких температурах прочность никелевых сплавов снижается настолько, что использование их в условиях значительных напряжений становится неэффективным.

Жаропрочные сплавы на основе никеля нередко называют *нимониками*. В состав этих сплавов кроме хрома добавляют титан, алюминий, молибден, вольфрам и т.д. Жаропрочные сплавы находят широкое применение в различных областях техники (производство авиационных двигателей, стационарных газовых турбин, химическое аппаратостроение и др.). Они предназначены для изготовления рабочих лопаток, турбинных дисков, колец, крепежа с длительным сроком службы, сопловых лопаток и других деталей газовых турбин, работающих при температуре до 850 °С.

Для получения высокой окалиностойкости никель легируют хромом (20%), а для повышения жаропрочности — титаном (1,0–2,8%) и алюминием (0,55–5,5%). При термической обработке они образуют с никелем (кобальтом, хромом) дисперсные интерметаллидные фазы типа $(\text{Ni, Co, Cr})_3\text{Ti}$; $(\text{Ni, Co, Cr})_3\text{Al}$, упрочняющие нимоники. Образуются также карбиды TiC и нитриды TiN, увеличивающие прочность при высоких температурах. Дальнейшего увели-

чения жаропрочности достигают легированием сплавов молибденом и вольфрамом: они повышают температуру рекристаллизации и затрудняют процесс диффузии в твердом растворе, который необходим для коагуляции избыточных фаз и рекристаллизации. Добавление к сложнолегированным сплавам кобальта еще больше увеличивает их жаропрочность и технологическую пластичность. Помимо упрочнения границ зерен бор и цирконий устраняют вредное влияние примесей, связывая их с тугоплавкими соединениями. Примеси серы, сурьмы, свинца и олова понижают жаропрочность сплавов и затрудняют их обработку давлением.

Самым простым по составу из дисперсно-твердеющих никелевых сплавов является сплав ХН77ТЮ. Более жаропрочный сплав ХН77ТЮР отличается от него присадкой бора в количествах 0,005–0,008%. После закалки от 1080–1120 °С сплав имеет структуру, состоящую из перенасыщенного γ -раствора с ГЦК-решеткой и поэтому обладает невысокой прочностью и высокой пластичностью, допускающей штамповку, гибку и профилирование. Сплав удовлетворительно сваривается. После закалки и старения при 700 °С он получает высокую жаропрочность.

Последующие разновидности сплавов отличаются от сплава ХН77ТЮР более высоким содержанием титана, алюминия и дополнительным введением ниобия, что повышает количество γ -фазы, выделяющейся при старении. Чтобы сохранить удовлетворительную пластичность сплавов, в них снижают содержание хрома. Однако уменьшение содержания хрома ниже 15% влечет за собой снижение сопротивления окислению. Поэтому сплавы с низким содержанием хрома требуют защиты от газовой коррозии.

Наилучшее сочетание длительной прочности и пластичности имеет сплав ХН65МПТЮ. Он получил широкое применение как материал для изготовления лопаток стационарных газовых турбин и крепежных деталей.

После двойной закалки от 1220 и 1050 °С на воздухе и старения при 850 °С сплав имеет высокую жаропрочность. Объясняется это большим количеством упрочняющей γ -фазы, выделяющейся из твердого раствора в процессе старения.

Жаростойкие сплавы на никелевой основе. Никель обладает более высокой жаростойкостью в окислительных средах, чем железо, так как его единственный оксид NiO менее дефектный, чем оксид FeO. Высокая жаростойкость сплавов никеля с хромом (нихромов) объясняется прежде всего образованием шпинели NiOCr_2O_3 . Жаростойкие сплавы на никелевой основе имеют в основном структуру

твердых растворов, мало упрочняются термической обработкой и обладают невысокой прочностью и жаропрочностью, но хорошей технологичностью.

Нихромы имеют высокое удельное электрическое сопротивление, поэтому их используют как материал для нагревателей электропечей, а также для изготовления камер сгорания, газопроводов и деталей газотурбинных установок.

Сплав, содержащий никель и 20% Cr, — основа большинства жаростойких никелевых сплавов. Содержание углерода ограничено 0,1%. Марганец снижает жаростойкость этих сплавов, кремний с этой целью не используется, так как снижает технологичность сплава. Для создания высокожаростойких никелевых сплавов используют алюминий. Лучший жаростойкий никелевый сплав — Х20Н80Ю3.

Жаростойкие сплавы на основе никеля в окислительных средах (парах воды, кислороде, синтетическом аммиаке) более стойки, чем сплавы на основе железа.

Жаростойкие сплавы на основе никеля не претерпевают фазовых превращений, и поэтому их термообработка состоит в высокотемпературном нагреве для выращивания зерна или снятия напряжений.

Хром, кобальт, молибден, вольфрам, ванадий, гафний существенно упрочняют твердый раствор, составляющий основу никелевого сплава.

Дисперсно-упрочненные композиционные материалы на основе никеля. В качестве упрочняющей фазы в ДКМ на основе никеля и его сплавов используют оксиды ThO_2 и HfO_2 . Оксид тория в количестве до 2% наиболее эффективен для упрочнения никеля и хрома (ВДУ-1, ТД-никель, DS-никель, ТД-нихром). Из-за токсичности оксида тория его часто заменяют оксидом гафния HfO_2 при производстве ДКМ ВДУ-2 (98% Ni; 2% HfO_2), что приводит к существенному снижению жаропрочности.

ДКМ на основе никеля предназначены в основном для работы при температурах выше 1000 °С. При температурах до 800 °С более высоким временным сопротивлением обладают ДКМ на основе никелевых сплавов типа ТД-нихром (80% Ni; 20% Cr), упрочненных 2% ThO_2 .

ДКМ на основе никеля и его сплавов применяют главным образом в авиационной и космической технике для изготовления лопаток газовых турбин, камер сгорания, теплозащитных панелей, а также сосудов и трубопроводов, работающих при высоких температурах в агрессивных средах.

19.2. БЕРИЛЛИЙ И ЕГО СПЛАВЫ

Свойства бериллия. Бериллий относится к группе легких металлов, с малой плотностью (менее 3 г/см³) (табл. 19.2).

Таблица 19.2

Основные физические свойства бериллия

Атомный номер	4
Атомная масса	9,0
Плотность при 20 °С, г/см ³	1,8
Температура плавления, °С	1284
Температура кипения, °С	2450
Атомный диаметр, нм	0,23
Скрытая теплота плавления, Дж/град	275
Удельная теплопроводность при 20 °С, Вт/(м·К)	188
Коэффициент линейного расширения при 25 °С, 1/град	$11 \cdot 10^{-6}$
Удельное электросопротивление при 20 °С, Ом·см	$3,6 \cdot 10^{-6}$
Модуль нормальной упругости E, МПа	$3 \cdot 10^5$

Бериллий — светло-серый металл, полиморфен, имеет ГПУ-решетку до 1250 °С и ГЦК-решетку — при более высоких температурах.

Бериллий и (особенно) его сплавы обладают малой плотностью, высокими модулем упругости и прочностью, размерной стабильностью, хорошей коррозионной стойкостью в ряде сред.

Чистый бериллий — твердый и прочный металл ($\sigma_b = 300$ МПа; $\delta = 1-2\%$), устойчив на воздухе вследствие образования на его поверхности пленки BeO, но при высоких температурах легко соединяется с кислородом и азотом.

Соединения бериллия — аэрозоли, мелкодисперсные частицы — обладают резко выраженными токсическими свойствами. Наиболее токсичными являются хлористые и фтористые соединения. В компактном виде бериллий безвреден. Сочетание высокого модуля упругости, теплопроводности и теплоемкости, малой плотности и других характеристик обусловило применение бериллия и его сплавов в ряде изделий авиаракетной техники, в том числе тормозов самолетов и теплозащитных экранов при вхождении возвращаемых аппаратов в плотные слои атмосферы, в зеркалах, замедлителях и отражателях тепловых нейтронов, материалах оболочек тепловыделяющих элементов атомных реакторов.

Бериллий широко используют в качестве присадок в алюминиевых сплавах для создания защитной пленки на жидком металле, в стали — для образования твердого диффузионного слоя.

Бериллий получают электролизом хлорида бериллия и NaCl (электролитный бериллий) или восстановлением фторида бериллия магнием (фторидный, или магниевое-термический, бериллий).

Электролитный бериллий имеет меньше примесей и большую пластичность, чем магниевое-термический. Для дальнейшего повышения чистоты бериллия проводят дистилляцию в вакууме, зонную плавку или электролиз с растворимым анодом.

Примеси, в частности алюминий, понижают пластичность бериллия. Его механические свойства меняются в зависимости от типа заготовки, величины зерна и чистоты металла. Самые высокие свойства — у заготовок, выдавленных из мелкозернистых порошков высокой чистоты; еще более высокие прочностные свойства имеет проволока.

На свойства бериллия сильно влияют концентраторы напряжений и общее состояние поверхности. Уменьшения влияния концентраторов достигают травлением и отжигом. При повышении температуры происходят заметное снижение прочности и увеличение пластичности. Бериллий обладает сравнительно невысоким сопротивлением ползучести. В качестве жаропрочного материала бериллий практически не применяют.

Бериллиевые сплавы. Улучшения свойств бериллия достигают не за счет легирования, а за счет чистоты. Достаточно иметь в бериллии 0,001% Si, как он становится совершенно хрупким.

Наличие кислорода улучшает свойства бериллия, а для всех других металлов кислород — вреднейшая примесь. Тем не менее существуют сплавы на основе бериллия.

Перспективным является сплав бериллия с 4–5% Cu. Введение меди уменьшает анизотропию, резко выраженную у бериллия.

Сплавы меди с бериллием (бериллиевые бронзы) обладают эффектами термической обработки, немагнитны, не искрят при ударе, имеют хорошую коррозионную стойкость, достаточно высокую прочность, а в закаленном состоянии — высокую пластичность.

Значительное распространение получили алюминиево-бериллиевые сплавы с магнием, сочетающие высокую прочность, пластичность, высокий модуль упругости, теплоемкость и теплопроводность. Добавка 0,5% Ni повышает длительную прочность бериллия при 900 °С. Лучшими технологическими свойствами отличаются сплавы бериллия, содержащие 2–4% Si; 0,1–1,0% Ag; 2–4% Al, или сплавы с 0,5% Ti и 0,1% Ag.

Более высокой пластичностью, чем бериллий, обладают двойные и тройные сплавы типа Al–Be и Al–Mg–Be (сплав АБМ). Высокая

пластичность фазы (Al), упрочненный Mg, вводимый в сплавы в концентрациях, не превышающих его предельную растворимость, благоприятно влияют на свойства сплавов. Растворимость магния с повышением содержания бериллия уменьшается, поэтому в сплавы системы Al–Be–Mg при самом низком содержании бериллия необходимо вводить наиболее высокое количество магния. В сплавах с наиболее высоким содержанием бериллия должно быть низкое содержание магния.

С увеличением содержания бериллия в сплавах систем Al–Be; Al–Be–Mg происходит значительно более интенсивный рост модуля упругости, который при содержании 70–80% Be достигает 245×10^3 МПа; плотность такого сплава равна 2 г/см³.

В результате этого сплавы на алюминиево-бериллиевой основе высокомодульные, и по модулю упругости в зависимости от состава превосходят высокопрочные сплавы на алюминиевой основе более чем в 2–3 раза.

Сплавы системы Al–Be–Mg имеют более высокий модуль упругости (на 14 700–39 200 МПа), чем сплавы системы Al–Be, при одинаковом содержании бериллия, хотя магний и твердый раствор магния в алюминии имеют модуль упругости ниже, чем алюминий. В сплавы вводят сравнительно немного магния.

Тройные сплавы системы Al–Be–Mg при содержании бериллия до 70% превосходят двойные сплавы системы Al–Be не только по прочности, но и по относительному удлинению. Это обеспечивает и более однородный и равномерный характер деформации при растяжении, и, как результат этого, одновременное повышение прочности и относительного удлинения.

При содержании Be около 70% достигается максимум прочности тройных сплавов. При дальнейшем повышении содержания Be прочность понижается при одновременном резком снижении пластичности. Поэтому сплавы системы Al–Be–Mg при содержании бериллия более 70–75% практически не применяют.

Резкое снижение относительного удлинения в сплавах данной концентрации объясняется тем, что количество (Al)-фазы уже недостаточно и она перестает оказывать пластифицирующее действие, как это происходит в сплавах, более богатых этой фазой. Сплавы с малым количеством (Al)-фазы можно рассматривать как бериллий, содержащий некоторое количество легкоплавкой составляющей, ухудшающей его свойства.

Благодаря наличию в сплавах типа Al–Be, Al–Be–Mg, содержащих до 70–75% Be, достаточного количества высокопластичной

алюминиевой составляющей, эти сплавы по сравнению с бериллием обладают хорошей общей и технологической пластичностью и удовлетворительно деформируются при 380–420 °С.

В процессе обработки давлением происходит деформация алюминиевой матрицы и бериллиевой фазы, поскольку бериллий при температурах около 400 °С имеет достаточно высокую пластичность.

Дисперсно-упрочненные композиционные материалы на основе бериллия. Материалы данного типа относятся к классу порошковых, в которых матрица из металла или сплава упрочняется искусственно введенными мелкодисперсными частицами размером менее 0,1 мкм в количестве 0,1–0,15%.

В качестве упрочняющей фазы используют дисперсные частицы оксидов, карбидов, нитридов, боридов и других тугоплавких соединений.

Смеси порошков получают механическим или химическим смешиванием, поверхностным или внутренним окислением, разложением смеси солей, водородным восстановлением или химическим осаждением из растворов.

После формования и спекания проводят горячую пластическую деформацию с целью получения беспористого полуфабриката.

Наиболее эффективными упрочнителями бериллия являются оксид BeO и карбид Be₂C. Временное сопротивление ДКМ Be–BeO повышается с увеличением содержания оксида; при этом эффективность упрочнения растет с увеличением температуры. Сопротивление ползучести и длительная прочность Be–BeO при повышенных температурах сравнительно невелики. Применение карбида Be₂C в качестве упрочняющей фазы позволяет повысить 100-часовую прочность бериллия при 650 °С в 3 раза, а при 730 °С — в более чем 5 раз.

19.3. АНТИФРИКЦИОННЫЕ СПЛАВЫ НА СВИНЦОВОЙ ОСНОВЕ

Антифрикционными сплавами на основе свинца являются *баббиты*. Их применяют для заливки подшипников скольжения.

Металл вкладыша должен обладать следующими свойствами:

- небольшим коэффициентом трения со стальной поверхностью;
- малой изнашиваемостью обеих трущихся поверхностей;
- способностью выдерживать достаточные удельные давления.

Первое и второе требования удовлетворяются, если поверхности вала и вкладыша разделены пленкой смазки.

Если структура вкладыша неоднородна и состоит из твердых включений и мягкой основы, то после непродолжительной работы

(«приработки») на поверхности вкладыша образуется микрорельеф — выступают твердые включения и между валом и вкладышем образуется пространство, в котором удерживается смазка (так называемый принцип Шарпи).

Кроме того, подшипниковые сплавы должны быть недорогими, иметь высокую коррозионную стойкость в среде масел и хорошие технологические свойства: невысокую температуру плавления (для удобства заливки), хорошую адгезию (сцепляемость) со стальной основой (вкладышем). Желательно, чтобы они обладали высокой теплопроводностью для быстрого отвода теплоты от трущихся поверхностей, достаточно хорошими механическими свойствами, особенно пределом выносливости, — для предотвращения выкрашивания из-за появления усталостных трещин. Чтобы подшипник надежно работал в условиях ударных нагрузок, его материал должен обладать достаточно высокой ударной вязкостью.

Чтобы передавать нагрузку на более прочную стальную основу, сплавы должны иметь невысокий модуль упругости.

Свинцовые баббиты. Самыми дешевыми являются свинцовые баббиты с кальцием и натрием: БКМ, БК2. Кальций и натрий образуют со свинцом твердые растворы переменной растворимости, что вызывает у этих баббитов склонность к естественному старению с повышением твердости. Растворимость кальция в свинце очень мала (при комнатной температуре — около 0,01%), и он присутствует в основном в виде химического соединения Pb_3Ca . В литом состоянии структура представляет собой α -твердый раствор натрия и кальция в свинце (мягкая основа) и дендриты химического соединения Pb_3Ca (твердые включения).

Баббит БК обладает плохой адгезией к стальному вкладышу и крепится в нем механическим путем. Баббит БК2 заливают на вкладыши тонким слоем. Их применяют для изготовления подшипников городского и железнодорожного транспорта, горнорудных машин.

Оловянно-свинцовые баббиты отличаются низким содержанием олова. В качестве мягкой основы они имеют эвтектику, состоящую из кристаллов α -твердого раствора и β -фазы. Твердыми включениями служат крупные избыточные кристаллы β -фазы и частицы интерметаллидных фаз Cu_3Sn ; Cu_2Sb .

Баббит Б16 применяют в подшипниках ответственного назначения для спокойных условий работы без ударных нагрузок. Из него изготавливают моторно-осевые и опорные подшипники электровозов, путевых машин, паровозов, гидротурбин и т.д.

Баббит Б71 дополнительно легирован Cd, As, Ni. Кадмий повышает его коррозионную стойкость, мышьяк улучшает жидкотекучесть и теплопроводность, никель упрочняет α -твердый раствор, повышает износостойкость и сопротивляемость окислению.

Свойства *баббита БН* зависят от условий литья и термической обработки. Его применяют для заливки вкладышей подшипников дизельных двигателей, компрессоров, судовых приводов, подвергающихся ударным нагрузкам; для заливки подшипников двигателей внутреннего сгорания, паровых турбин, паровых машин.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие легирующие элементы обеспечивают жаропрочность никелевых сплавов?
2. Какую структуру имеют жаростойкие сплавы?
3. Какой термической обработкой упрочняют жаропрочные никелевые сплавы?
4. Назовите особенности и область применения дисперсно-упрочненных композиционных материалов на основе никеля.
5. Какова особенность применения бериллия и его сплавов?
6. Перечислите основные сплавы бериллия и их свойства.
7. Благодаря каким свойствам дисперсно-упрочненные композиционные материалы на основе бериллия нашли применение в ракетостроении?
8. Какова структура антифрикционных сплавов на свинцовой основе?

Раздел VI

НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Глава 20

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

20.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Одной из основных задач современной науки является разработка научных принципов получения новых материалов с комплексом уникальных свойств. Композиционные материалы независимо от их происхождения являются результатом объемного сочетания разнородных компонентов, один из которых пластичен (связующее, матрица), а другой обладает высокой прочностью и жесткостью (наполнитель, арматура); при этом композиции приобретают свойства, которых не имеют отдельные составляющие. В качестве обоих компонентов могут выступать самые разнообразные по природе и происхождению материалы. Известны композиты на базе металлов, керамики, стекол, углерода, пластиков и других материалов.

Для композиционных материалов характерна следующая совокупность признаков:

- композиция должна представлять собой сочетание хотя бы двух разнородных материалов с четкой границей раздела между фазами;
- компоненты композиции образуют ее своим объемным сочетанием;
- композиция должна обладать свойствами, которых нет ни у одного из ее компонентов в отдельности.

20.2. СТРУКТУРА И СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Существующие композиционные материалы можно разделить на три основных класса, отличающихся микроструктурой: *дисперсно-упрочненные, упрочненные частицами и армированные волокнами*. Все эти материалы представляют собой матрицу из какого-либо вещества или сплава, в которой распределена вторая фаза — обычно более

жесткая, чем матрица, которая служит для улучшения того или иного свойства. В основе разделения трех упомянутых классов композиционных материалов лежат особенности их структуры.

Для *дисперсно-упрочненных* композиций характерной является микроструктура, когда в матрице равномерно распределены мельчайшие частицы в количестве от 1 до 15 объемных процентов.

Природа упрочняющего эффекта в композитах связана с использованием двух материалов с различными прочностью и модулем упругости. Этот эффект следует связать с появлением в материале поверхности раздела фаз и пограничных слоев, примыкающих к ней. Именно более высокие характеристики материала пограничных слоев обеспечивают рост прочностных показателей материала, и именно по этой причине в дисперсно-упрочненных композитах стремятся к использованию тонкодисперсных жестких компонентов, распределенных в более пластичной матрице. В композициях, *упрочненных частицами*, реализации наиболее высоких показателей достигают при условии хорошего контакта (смачивания) на поверхности раздела. Вместе с тем возможность химического взаимодействия на поверхности и в пограничном слое, особенно в условиях эксплуатации, нежелательна, так как это может привести к утрате упрочняющего эффекта.

Для достижения максимального упрочняющего эффекта более прочный компонент должен играть роль усиливающей, упрочняющей структуры, иметь достаточную длину и прочность сцепления с матрицей. Естественно, что в этом случае наиболее выгодной формой использования армирующей фазы является тонкое волокно. Известно, что с уменьшением толщины волокон их прочность заметно возрастает.

Другое важнейшее направление практического использования композитов — повышение жаропрочности, то есть способности сохранять высокий уровень механических характеристик при повышенных температурах. Для этого также можно использовать волокна, однако лишь такие, температура плавления которых значительно выше температуры плавления матрицы. Для всех материалов такого рода необходимо учитывать способность к химическому взаимодействию при высоких температурах, величину деформации при разрушении каждого из компонентов, а также величину времени до разрушения или величину относительного удлинения при разрушении каждого из компонентов в процессе жаропрочных испытаний под нагрузкой.

Следует подчеркнуть, что для жаропрочных материалов в качестве волокон наибольший интерес представляют нитевидные кристаллы

различного состава и поликристаллические керамические волокна. Наряду с ними широкое применение находят также металлические волокна (проволоки) из сплавов и благородных металлов.

В зависимости от особенностей свойств матричных материалов имеется значительное количество различных технологических приемов, позволяющих изготовить достаточно широкий круг изделий.

20.3 ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

К группе дисперсно-упрочненных композиций относятся главным образом материалы на основе металлических матриц, где в качестве дискретных частиц выступают оксиды (SiO_2 , Al_2O_3 — в медной матрице), а также материалы на основе некоторых силикатных матриц. Из-за близости формы дисперсных частиц к сферической анизотропии свойств в материалах практически не возникает. Основной механизм упрочняющего действия в таких композиционных материалах связан с повышением сопротивляемости матрицы деформациям под действием нагрузок, так как дисперсные частицы тормозят движение в ней дислокаций. Величина возрастания прочностных характеристик относительно невелика. Однако большую ценность этим материалам придает их способность работать при повышенных температурах. Так, использование в качестве упрочняющих фаз стабильных тугоплавких соединений (оксиды тория, гафния, иттрия, сложные соединения оксидов и редкоземельных металлов), не растворяющихся в матричном металле, позволяет сохранить высокую прочность материала — до $0,9\text{--}0,95 T_{\text{пл}}$. В связи с этим такие материалы чаще применяют как жаропрочные. Дисперсно-упрочненные композиционные материалы могут быть получены на основе большинства применяемых в технике металлов и сплавов.

Для композиционных материалов на основе металлических матриц наибольшее распространение получили методы порошковой металлургии, электрохимические, получение окислением или восстановлением, кристаллизацией из расплава (Mo-TiC). Некоторые из таких композитов обладают интересными свойствами. Так, композиционный материал на основе меди и оксида бериллия сохраняет более 80% электрической проводимости при комнатной температуре даже после 2000 ч выдержки при 850°C , будучи при этом более прочным, чем медь и ряд ее сплавов. При восстановлении оксида никеля, содержащего дискретную двуокись тория (3%), получают

материал, известный под названием ТД-никель, который обладает значительно более высокой длительной прочностью при температуре 1090 °С по сравнению со сверхпрочными сплавами никеля.

Широкое применение получили сплавы ВДУ-1 (никель, упрочненный двуокисью тория), ВДУ-2 (никель, упрочненный двуокисью гафния) и ВД-3 (матрица Ni + 20% Сг, упрочненная окисью тория), обладающие высокой жаропрочностью.

Дисперсно-упрочненные композиционные материалы стойки к разупрочнению с повышением температуры и длительности выдержки при данной температуре.

20.4. КОМПОЗИТЫ, АРМИРОВАННЫЕ ВОЛОКНАМИ

Наиболее обширную и разнообразную по своему составу группу составляют композиционные материалы, армированные волокнами. Это объясняется тем, что в композитах данного типа удастся реализовать наиболее высокие прочностные и термические характеристики, так как именно использование волокон дает наибольший упрочняющий эффект. На рис. 20.1 приведены схемы армирования композитов.

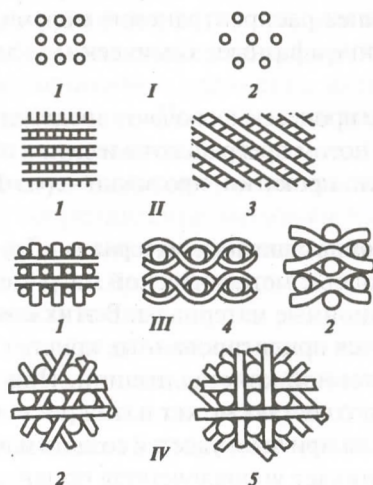


Рис 20.1. Схемы армирования композиционных материалов:

I — однонаправленная; II — двухнаправленная; III — трехнаправленная; IV — четырехнаправленная; 1–5 — укладка волокон (1 — прямоугольная, 2 — гексагональная, 3 — косоугольная, 4 — с искривленными волокнами, 5 — система из n нитей)

Армированные волокнами металлы. К числу наиболее универсальных видов композитов следует отнести армированные волокнами металлы — они позволяют существенно повысить и прочность, и жаростойкость. Для эффективного упрочнения волокно должно быть прочнее и жестче матрицы, которая в этом случае передает нагрузку на более прочное волокно. Используемые для этих целей волокна в значительной степени предопределяют возможные методы получения композиционных материалов и изделий из них: керамические волокна и волокна из оксидов («усы» оксидов, боридов, карбидов, нитридов) из-за высокой хрупкости не допускают пластического деформирования матрицы, тогда как более пластичные волокна и «усы» из металлов допускают возможность переформирования заготовок. Из-за плохого смачивания металлами и с целью уменьшения опасности преждевременного разрушения керамические волокна и «усы» иногда покрывают пленкой из металла (через расплав или из газовой фазы). Как уже отмечалось, использование очень тонких волокон и «усов» позволяет достигать наиболее высоких показателей прочности композитов, однако необходимость предотвращения их разрушения на всех промежуточных стадиях и придания им ориентации создает большие трудности в технологическом плане.

При производстве композиционных материалов с металлической матрицей наибольшее распространение получили твердофазные, жидкофазные, газопарафазные, химические и электрохимические процессы.

Как правило, все процессы включают предварительное получение заготовок, которые потом превращают в изделия или полуфабрикаты путем их опрессовки, прокатки, протяжки через фильеру, диффузионной сварки и др.

Эвтектические композиционные материалы. Другим видом композиционных материалов с металлической матрицей являются эвтектические композиционные материалы. В этих композитах упрочняющей фазой являются ориентированные кристаллы, образующиеся в процессе направленной кристаллизации. При охлаждении жидкостей определенного состава может идти кристаллизация с образованием двух фаз. Если при этом удастся создать плоский фронт кристаллизации, то возникает упорядоченная ориентированная микроструктура. Такую структуру в сплавах эвтектического состава получают методами направленной кристаллизации (методы Чохральского, Бриджмена, зонной плавки).

В отличие от обычных композиционных материалов, получаемых путем последовательного выполнения нескольких трудоемких тех-

нологических операций, эвтектические композиционные материалы получают за одну операцию. Практически это один из путей формирования нитевидных кристаллов (типа «усов») непосредственно в матрице. Направленная ориентированная структура может быть получена на уже готовых изделиях. Такие композиты получены, в частности, из меди и хрома, алюминия и никеля, меди и вольфрама. В последнем случае была достигнута прочность 175 кгс/мм².

К преимуществам таких композитов следует отнести простоту их получения — нет необходимости отдельного изготовления «усов», что исключает трудности, связанные с их использованием; высокое значение прочности связи на поверхности раздела; отсутствие оксидных слоев, обеспечивающее высокую термическую устойчивость — возможность длительной работы при повышенных температурах. Однако для указанных композитов характерно постоянство объемной доли эвтектической фазы, что делает невозможным воздействие на свойства путем изменения состава. Кроме того, для реализации плоского фронта кристаллизации необходимо использовать высокочистые вещества, так как примеси этому препятствуют.

Керамика, армированная волокнами. Керамика характеризуется низкой прочностью при растяжении в сочетании с высоким модулем Юнга, низкой ударной вязкостью. При высоких температурах одной из причин выхода из строя изделий из керамики является растрескивание. Это создает большие трудности при армировании ее волокнами, поскольку недостаточное удлинение матрицы препятствует передаче нагрузки на волокно. Поэтому волокна должны иметь еще более высокий модуль, чем матрица. В этих целях часто используют металлические волокна. Сопротивление растяжению растет при этом незначительно, но сопротивление тепловым ударам существенно повышается. При этом в зависимости от соотношения коэффициентов термического расширения матрицы и волокна возможны случаи, когда прочность падает.

Материалы такого рода готовят методами горячего прессования (таблетирование с последующим спеканием под давлением) или методом шликерного литья, когда волокна заливают суспензией матричного материала, которая после сушки также подвергается спеканию.

20.5. НАНОКОМПОЗИТЫ

Наноконпозиционными или — в более широком аспекте — *наноструктурированными материалами* называются материалы, имеющие средний размер одной из фаз менее 100 нм. Основными структур-

ными параметрами наночастиц являются их форма, размер, а также распределение частиц по размерам.

Уникальные свойства наночастиц определяются их чрезвычайно высокой удельной поверхностью (отношение поверхности к объему).

Физические, электронные и фотофизические свойства наночастиц и кластеров значительно отличаются как от свойств блочного материала, так и от свойств индивидуального атома.

Другими важнейшими факторами, определяющими свойства конечного материала, как и в случае композитов, являются природа взаимодействия между фазами и строение межфазных областей, объемная доля которых чрезвычайно велика.

Используемые неорганические наночастицы обеспечивают широкий класс материалов — от металлов и керамик (оксиды, нитриды, карбиды, силикаты и т.д.) до биоминералов.

Для наноструктур доля поверхностных атомов ($N_{\text{пов}}$) соизмерима (или даже больше) с числом атомов в объеме частицы ($N_{\text{об}}$).

Уменьшение размера приводит к увеличению доли атомов, образующих поверхность кристаллика, что может оказывать существенное влияние на многие физические характеристики. Проблема осложняется тем, что из-за очень малых размеров наноструктуры являются достаточно неравновесными системами.

Значительный интерес к наноструктурам связан с перспективами их широкого использования в микроэлектронике, оптике, акустоэлектронике.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие материалы называют композиционными?
2. Какова природа упрочняющего эффекта в композиционных материалах?
3. Каков механизм дополнительного упрочняющего действия в дисперсно-упрочненных композиционных материалах?
4. Какие материалы используют в качестве упрочняющих волокон?
5. Что такое нанокомпозиты? Каковы их разновидности?

Глава 21

ПЛАСТИЧЕСКИЕ МАССЫ

21.1. ПЛАСТМАССЫ

По сравнению с металлами применение пластмасс экономически более выгодно благодаря простоте изготовления изделий из них и малому количеству отходов, небольшой стоимости пластмасс, меньшим расходам на перевозку, монтаж и эксплуатацию изделий.

Однако под действием окружающей среды полимеры стареют. При старении происходит как разрыв макромолекул на части, так и соединение частей самих молекул друг с другом поперечными связями. Интенсивность старения определяется условиями эксплуатации и структурой. Материалы, стойкие в одних условиях, быстро разрушаются в других. Термопласты и резины стареют быстрее, чем реактопласты.

Теплостойкость. Все полимеры разрушаются при нагреве, и большинство разлагается при температуре 150–300 °С. Стойкость композиций на основе пластмасс зависит от свойств наполнителей, пластификаторов и других составляющих. Пластмассы с неорганическими наполнителями (стеклянное волокно, асбест и др.) более стойки, чем пластмассы с органическими наполнителями (бумага, дерево, хлопчатобумажное волокно). Некоторые полимеры (полистирол, органическое стекло, а также пористые пластмассы на их основе) огнеопасны. Горючесть их устраняется специальными добавками или модифицированием полимеров.

Теплофизические свойства. Полимеры плохо проводят тепло, сильно расширяются при нагреве и имеют значительную теплоемкость.

Теплопроводность полимеров в десятки и сотни раз меньше, чем металлов. Пластмассы, наполненные графитом или металлическим порошком, значительно более теплопроводны.

Наименьшую теплопроводность имеют пористые пластмассы.

Коэффициенты теплового расширения полимеров в 10–30 раз больше, чем металлов. Из-за различия коэффициентов теплового расширения полимеров и металлов возникают термические напряжения при плотном соединении материалов друг с другом.

Электрические свойства. Полимеры характеризуются небольшими значениями диэлектрической проницаемости ($\epsilon' = 2-3$), вы-

соким удельным объемным электросопротивлением $\rho_v = 10^{10}$ Ом/см и электрической прочностью $E_{пр} = 10\text{--}500$ кВ/мм.

Пластмассы легко электризуются при трении и долго сохраняют статические заряды на поверхности. Не электризуются пластмассы, наполненные графитом или порошками металлов, а также пластмассы со специальными добавками против электризации.

Большинство пластмасс не используют при частотах электрического поля свыше 20 000 Гц, так как они недопустимо разогреваются и теряют электрическую прочность. Высокочастотными пластмассами являются неполярные полиэтилен, фторопласт-4, полистирол.

Механические свойства. Пластмассы характеризуются вязкоупругим поведением полимеров под нагрузкой. *Деформация полимера* — это сумма упругой, высокопластичной и вязкотекучей деформаций.

Соотношения между тремя составляющими общей деформации непостоянны и зависят от структуры материала, температуры и условий деформирования. Полная характеристика поведения пластмассы под нагрузкой представляет сложную задачу. При необходимости механические свойства оценивают по результатам испытаний на растяжение, сжатие, удар, хотя эта оценка неполна.

Особенности механических свойств пластмасс таковы.

Малая жесткость. Практически все полимеры и пластмассы имеют низкие модули, которые в 100—1000 раз меньше, чем у металлов. Наполнители незначительно увеличивают жесткость. Жесткость реактопластов больше жесткости термопластов.

Зависимость свойств от температуры. При повышении температуры прочность и жесткость уменьшаются и пластмассы становятся более вязкими; ускоряется ползучесть под нагрузкой и теряется несущая способность. При понижении температуры возрастают прочность и жесткость, но уменьшается сопротивление удару.

Зависимость от скорости деформирования. При увеличении скорости деформирования повышается жесткость пластмасс, так как не успевает развиваться высокоэластичная деформация и возрастает склонность к хрупкому разрушению.

Зависимость от длительности нагружения. При длительном действии нагрузки уменьшается прочность и появляется ползучесть. С ростом напряжений и температуры ползучесть увеличивается.

Зависимость свойств от структуры. Пластмассы с неоднородной структурой имеют различные значения механических свойств. Слоистые пластики имеют максимальную прочность вдоль листов наполнителя.

Вдоль ориентированных вытянутых молекул прочность термопластов максимальна, а в поперечном направлении уменьшена.

При повышенных температурах допустимые напряжения снижаются.

Сопротивление усталости. При переменных нагрузках пластмассы отличаются долговечностью и большей, чем у многих сталей и сплавов, деформирующей способностью.

Плотность. Полимеры имеют плотность от 0,9 до 2,2 г/см³, самые легкие — полиэтилен и полистирол, а самый тяжелый — фторопласт-4 плотностью 2,2 г/см³. Плотность пластмасс обычно равна 1,1–1,6 г/см³, а пористых пластмасс — всего 0,01–0,2 г/см³.

Стойкость в агрессивных средах. Полимеры стойки против длительного действия промышленных агрессивных сред, включая щелочи и концентрированные кислоты, и применяются для изготовления защитных покрытий на металлы.

21.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ПЛАСТМАСС

Основой классификации служит химический состав полимеров. В зависимости от природы полимера пластмассы разделяют на *фенолформальдегидные, эпоксидные, полиэфирные, полиамидные, полиуретановые* и др. В группе пластмасс, близких по химическому составу, могут оказаться термопластичные и термореактивные вещества, жесткие и резиноподобные пластмассы и т.п.

В зависимости от состава пластмассы подразделяют на *простые* и *сложные*. Простые пластмассы — это чистые полимеры без добавок. Они отличаются наивысшими электрическими свойствами, прозрачностью и удобны для переработки в изделия. Сложные пластмассы — это полимеры с различными добавками. Они прочнее, дешевле и разнообразнее по свойствам, чем простые пластмассы. Свойства вторых определяются свойствами полимера и свойствами и количеством других составляющих.

Пластмассы без наполнителей называются *ненаполненными*, а с наполнителями — *наполненными*. По виду наполнителя пластмассы подразделяют на пресс-порошки, волокниты и слоистые пластики. В пресс-порошках используют порошковые наполнители, в волокнитах — волокна, в слоистых пластиках — листы наполнителя. Пористые пластмассы называются *поропластами* или *пенопластами*.

Сложные пластмассы относят к композиционным материалам.

Сортамент пластмасс. Пластмассы производят в виде порошков, гранул, таблеток, волокон наполнителей, пропитанных

полимерами, в виде полуфабрикатов — пленок, листов, плит, стержней, труб и блоков. Некоторые реактопласты выпускают в виде жидких веществ, которые смешиваются перед употреблением (полиэфиры, эпоксиэпоксиды, полиуретаны и др.). Жидкие смеси удобны для пропитки наполнителей, склеивания, нанесения покрытий на металлы.

21.3. РЕЗИНЫ

Резина — важный конструкционный материал для производства технических изделий во многих отраслях народного хозяйства. Она является продуктом химического превращения (вулканизации) каучуков. Каучуки, взаимодействуя с определенными вулканизирующими веществами, претерпевают внутренние химические изменения, в результате чего образуется новый продукт — резина. Исходный материал для получения резины — резиновая смесь. Ее основу составляет каучук, содержание которого колеблется в различных изделиях от 5 до 95%.

Резина обладает совокупностью ценных свойств — высокой упругостью и способностью поглощать вибрации; она хорошо сопротивляется истиранию и многократным растяжению и изгибу. Резина газо- и водонепроницаема, стойка против воздействия масел, жидкого топлива и ряда других сред и является диэлектриком. Созданы электропроводная, магнитная, прозрачная и другие резины с новыми свойствами. Резина в готовом изделии находится в термостабильном состоянии; она нерастворима (но способна набухать) и иногда непластична. Исходная же (невулканизированная) резиновая смесь обладает хорошей пластичностью, обеспечивающей возможность формообразования различных изделий.

Упругопрочностные свойства резины при растяжении характеризуются: условным пределом прочности — отношением силы, вызывающей разрыв образца, к его первоначальному сечению; относительным удлинением — отношением длины образца в момент разрыва к его первоначальной длине; условным напряжением при заданном удлинении образца, а также величинами истинного напряжения при заданном удлинении и истинной прочностью.

Сопротивление резины истиранию выражается потерей объема резины, отнесенного к работе трения, и интенсивностью истирания — потерей объема резины в единицу времени.

Набухание резины определяется при нахождении ее определенное время в какой-либо жидкости и характеризуется увеличением массы

(или объема), отнесенной к исходной массе (или объему), и выражается в процентах.

Эластичность резины — свойство резины упруго деформироваться без разрушения под действием силы и восстанавливаться после прекращения действия силы, то есть отношение возвращенной энергии к энергии, затраченной на деформацию образца при ударе, выраженное в процентах.

Старение резины — снижение ее свойств (прочности, эластичности, электрического сопротивления и др.) под воздействием эксплуатационных факторов (теплоты, холода, света, воздуха, кислорода, механического нагружения и др.).

Теплостойкость резины определяют по снижению предела прочности и относительного удлинения после действия на нее насыщенного пара и не менее чем двухчасового отдыха.

Коэффициент теплостойкости резины (K_T) — сопротивление разрыву после шестичасового воздействия насыщенного пара определяют не менее чем через 2 ч выдержки при нормальных условиях и вычисляют по формуле

$$K_T = A_T / A,$$

где A — условная прочность при разрыве до воздействия пара, МПа; A_T — условная прочность при разрыве после воздействия насыщенного пара, МПа.

Морозостойкость резины — ее способность сохранять эластичность и другие свойства при низких температурах. Морозостойкость определяют несколькими способами:

- измерением деформации образца при нормальной (комнатной) и минусовой температурах при одних и тех же величинах и условиях нагружения;
- по эластическому восстановлению образца, сжатого при комнатной и выдержанного при пониженной температурах после снятия нагрузки;
- растяжением образца до заданного удлинения при 23 °С и определением величины удлинения того же «отдохнувшего» образца при низкой температуре под воздействием того же груза.

Во всех случаях потом определяют коэффициент морозостойкости.

Светостойкость резины — стойкость к старению в климатических условиях при преимущественном воздействии солнечной радиации.

Атмосферостойкость резины — стойкость к старению в климатических условиях под воздействием температуры, влажности воздуха и других факторов.

Свойства резины зависят прежде всего от свойств ее основы — каучука. Каучуки по своему происхождению разделяются на *натуральные* (или естественные) и *синтетические* (или искусственные).

Натуральный каучук получают из млечного сока (латекса) каучконосных растений. Это природный полимер, обладающий при обычных температурах высокими эластическими свойствами. Важнейшие типы — рифленый смокед-шит (продукт светло-янтарного цвета), светлый креп (продукт светлокремового цвета).

Синтетический каучук (СК) по свойствам близок к натуральному. Его получают путем синтеза из органических веществ. Промышленные виды СК, которых насчитывается несколько десятков, различаются между собой как по исходному сырью и способам производства, так и по составу и физико-механическим свойствам. Производство СК складывается из двух основных процессов: получения мономеров (бутадиен, стирол, хлоропрен, акрилонитрил и др.) и их полимеризации в каучукообразный продукт. Сырьем для получения мономеров являются нефтепродукты, природный газ, ацетилен, древесина и др.

СК представляют собой высокомолекулярные вещества, обладающие свойствами, подобными естественным каучукам, и способные вулканизироваться. Общепринятой является классификация СК по областям применения: каучуки *общего назначения*, применяемые в массовом производстве таких изделий, в которых реализуется основное свойство резины — эластичность (шины, транспортные ленты, резиновая обувь и др.), и каучуки *специального назначения*, применяемые в производстве изделий, которые, наряду с эластичностью, должны обладать стойкостью к воздействию различных агентов (растворителей, кислот, щелочей, нефтепродуктов, кислорода, озона и т.д.), тепло- и морозостойкостью (то есть способностью сохранять эластические свойства в широком интервале температур) или другими специальными свойствами. Эта классификация по областям применения весьма условна. Так, многие СК обладают комплексом свойств, позволяющих применять их как каучуки общего и специального назначения; вместе с тем к ряду резин общего назначения предъявляют также и специфические требования (например, масло- и бензостойкость — для резиновых перчаток и обуви, морозостойкость — для шин и др.).

21.4. ПРИГОТОВЛЕНИЕ РЕЗИНОВЫХ СМЕСЕЙ

В состав смеси для приготовления резины вводят *вулканизирующие вещества*, обладающие способностью при химическом взаимодействии с каучуками вызывать в них химические изменения. К ним относятся сера, окислы металлов, различные смолы и др.

Для вулканизации отформованные полуфабрикаты из сырой резиновой смеси нагревают до температуры 140 °С. При этом вулканизирующее вещество (чаще всего сера) вступает в соединение с каучуком, и полуфабрикат, теряя пластичность, становится эластичным, формование может совмещаться с нагревом.

Свойства получаемой резины во многом зависят от количества вулканизирующих веществ (до 5% от массы каучука). Увеличение содержания серы уменьшает эластичность резины. Если в составе смеси сера превысила 25%, то получается твердая резина, или эбонит.

При производстве резины используют также ускорители вулканизации, наполнители, противостарители, мягчители, пластификаторы, красители и регенерат.

Ускорители вулканизации — химические вещества, вводимые в состав резиновых смесей в небольших количествах с целью сокращения продолжительности вулканизации и снижения температуры этого процесса. К ускорителям относятся органические продукты: дифенилгуанидин, каптакс, тиурам и некоторые минеральные вещества.

Наполнители в составе смеси придают резине определенные свойства. Их делят на активные и неактивные. Активные (сажа, окись марганца и др.), количество которых в смеси достигает 45–60%, способствуют повышению некоторых механических свойств резины (сопротивления растяжению, износостойкости и др.). Неактивные не оказывают существенного влияния на механические свойства резины, их вводят главным образом с целью ее удешевления.

Противостарители — вещества, предохраняющие резину от быстрого старения, то есть изменения физико-механических свойств с течением времени. В качестве таких веществ применяют органические соединения в количестве 3–5% от массы резиновой смеси. К противостарителям относятся ароматические амины, диамины — продукты конденсации аминов с альдегидами, эфирами и т.д.

Мягчители и пластификаторы — вещества, которые облегчают смешение каучука с твердыми порошкообразными составляющими

и придают резине мягкость, эластичность и морозостойкость. Это стеариновая и олеиновая кислоты, некоторые минеральные масла, парафин и т.п. В смеси их 2–5%.

Красители окрашивают резину в определенный цвет и в некоторых случаях замедляют старение. В качестве красителей применяют ультрамарин, охра и др.

Регенерат — пластичный продукт, который получают специальной обработкой бывшей в употреблении резины. Применение регенерата удешевляет производство резины и несколько повышает ее пластичность.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение понятия «полимерные материалы».
2. По какому принципу и как классифицируются полимерные материалы?
3. Назовите основные свойства пластмасс.
4. Каковы различия между термореактивными и термопластичными материалами?
5. Назовите основные свойства резины.
6. Какие каучуки используют при получении резины?
7. Каково назначение активных и неактивных наполнителей в составе резины?
8. От каких компонентов резины и как зависят ее свойства?

Часть 2

ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ

Раздел VII

ОСНОВЫ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Глава 22

ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА И УСЛОВИЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

22.1. ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ МЕТАЛЛОВ

Кристаллизацией (первичной) называют процесс перехода металла из жидкого состояния в твердое. Движущей силой процесса является стремление системы (сплава) к более термодинамически устойчивому состоянию, характеризующемуся пониженной свободной энергией (энергией Гиббса G) (рис. 22.1). Здесь T — равновесная температура кристаллизации, когда термодинамические потенциалы расплава и твердого металла равны: $G_{\text{ж}} = G_{\text{тв}}$; $T_{\text{ф}}$ — фактическая температура кристаллизации; $\Delta T = T_s - T_{\text{ф}}$ — степень переохлаждения.

Кристаллизация чистого металла происходит при постоянной температуре, причем, чем выше скорость охлаждения ($v_2 > v_1$), тем больше степень переохлаждения ($\Delta T_2 > \Delta T_1$) (рис. 22.2). При кристаллизации происходит образование зародышей, вырастающих затем в кристаллиты (зерна).

Минимальный размер зародыша, обеспечивающий его устойчивость, рост и осуществление процесса кристаллизации, называют *критическим* (рис. 22.3). В процессе образования зародыша размером $r_{\text{кр}}$ происходят увеличение межфазной поверхностной энергии (ΔG_s) и уменьшение объемной свободной энергии (ΔG_v) расплава

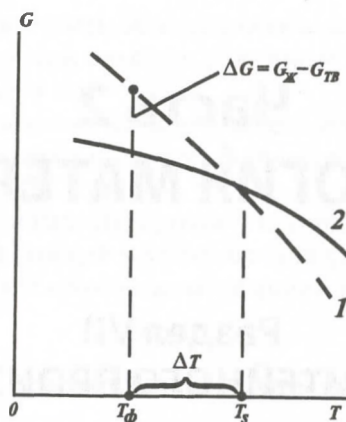


Рис. 22.1. Температурная зависимость свободной энергии (G) металла в жидком (1) и твердом (2) состояниях

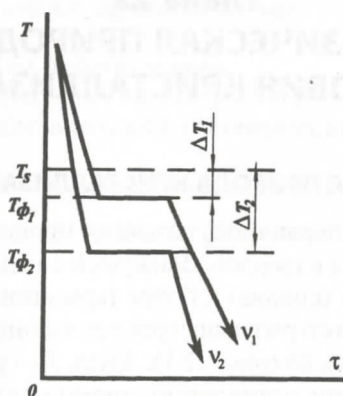


Рис. 22.2. Влияние скорости охлаждения на характер термических кривых ($v_1 > v_2$)

за счет появления поверхностей раздела. Общее изменение свободной энергии металла ($\Delta G_{\text{общ}}$) в результате формирования твердой частицы сферической формы радиуса r равно

$$\Delta G_{\text{общ}} = \Delta G_v + \Delta G_s = -L\rho(\Delta T/T_{\text{пл}}) \cdot \frac{4}{3}\pi r^3 + 4\pi r^2\gamma_{\text{т-ж}}, \quad (22.1)$$

где L — удельная теплота кристаллизации; ρ — плотность металла; ΔT — степень переохлаждения; $T_{\text{пл}}$ — температура плавления металла; $\gamma_{\text{т-ж}}$ — удельная поверхностная (межфазная) свободная энергия на границе твердой и жидкой фаз. Зародыш может сохраняться лишь при условии уменьшения $\Delta G_{\text{общ}}$ (при фиксированном переохлаждении ΔT). Однако при малых размерах частицы это

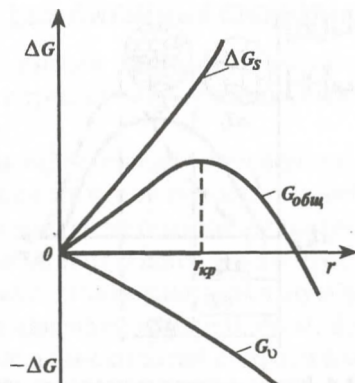


Рис. 22.3. Зависимость изменения свободной энергии расплава от размера зародышей

условие не реализуется, поскольку отношение площади поверхности частицы к объему слишком велико. Зародыши же с размерами, равными критическому и больше критического ($r_{кр}$), растут с уменьшением энергии и поэтому способны к существованию. Критический размер зародыша определяется из условия

$$d(G_{общ})/dr = 0; \quad (22.2)$$

$$r_{кр} = \gamma_{т-ж} T_{пл} / (L\rho\Delta T). \quad (22.3)$$

Из уравнения (22.3) видно, что с уменьшением межфазного натяжения ($\gamma_{т-ж}$) и увеличением степени переохлаждения критический размер зародыша уменьшается.

Рост кристаллов характеризуется скоростью роста линейных размеров кристалла; размерность — м/с. Интервалы метастабильности (ΔT) для процессов зарождения и роста кристаллов неодинаковы: $\Delta T_{ср}$ меньше $\Delta T_{ч.ц.}$. На рис. 22.4 приведены зависимости скорости роста (с.р) кристаллов и числа центров кристаллизации от степени переохлаждения металла.

В зависимости от степени переохлаждения отношение между ними изменяется; это приводит к тому, что с увеличением ΔT изменяется зерно металла.

Передача теплоты литейной форме при затвердевании сплавов осуществляется через расплав, слой затвердевшего металла и поверхность раздела «металл — форма». При этом интенсивность процесса теплообмена определяется критерием Био:

$$Bi = \alpha/(\lambda/l), \quad (22.4)$$

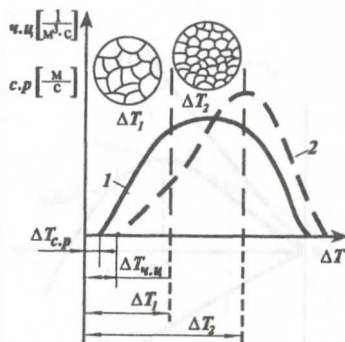


Рис. 22.4. Влияние степени переохлаждения на параметры кристаллизации и структуру металла:

1 — скорость роста (с.р); 2 — число центров (ч.ц)

где α — коэффициент теплоотдачи от поверхности тела к окружающей среде; λ — коэффициент теплопроводности; l — толщина тела; λ/l — термическая проводимость данного тела.

В процессе затвердевания отливка охлаждается, а форма нагревается. Литейные формы существенно различаются также по теплофизическим свойствам, поэтому процессы затвердевания отливок в различных формах, будучи подобными, в то же время характеризуются различными значениями критерия Bi (от 0 до ∞). Например, при литье в песчаные формы значения критерия Био для отливки и песчаной формы находятся в следующих пределах: $Bi_{отл} \ll 1$; $Bi_{\phi} \gg 1$. Для данного случая решение уравнения теплопроводности имеет вид

$$\tau^{1/2} = Lm / (1,13b_{\phi} \Delta T_{м-ф} S), \quad (22.5)$$

где τ — время затвердевания (без учета времени отвода теплоты перегрева); l — удельная теплота кристаллизации; m — масса отливки; S — площадь суммарной поверхности отливки; $\Delta T_{м-ф} = t_m - t_{\phi}$ — перепад температур металл—форма (t_m — температура расплава; t_{ϕ} — начальная температура формы); $b_{\phi} = (\lambda_{\phi} C_{\phi} \rho_{\phi})^{0,5}$ — коэффициент аккумуляции теплоты (мера скорости поглощения теплоты материалом формы); C_{ϕ} — теплоемкость формы.

Из уравнения (22.5) видно, что время затвердевания отливки в песчаной форме в основном определяется перепадом температур $\Delta T_{м-ф}$ и теплоаккумулирующей способностью b_{ϕ} .

22.2. ЛИТЕЙНЫЕ СВОЙСТВА

Основными литейными свойствами являются жидкотекучесть, усадка, склонность к трещинообразованию, склонность к газопоглощению и ликвация.

Жидкотекучесть характеризует способность сплава течь по литейной форме, заполнять все ее полости и давать четкие очертания отливки. Для сравнительной оценки жидкотекучести сплавов используют различные пробы. Наиболее распространенной является спиральная проба: металл заливают в песчаную форму, выполненную в виде спирального канала сечением 0,56 см. Величину жидкотекучести определяют по длине отлитой спирали в миллиметрах.

Жидкотекучесть зависит от состава сплава, температуры его заливки и свойств формы. Хорошую жидкотекучесть имеют серые чугуны, оловянистые бронзы, силумины. Так как с повышением температуры сплава его жидкотекучесть увеличивается, то для тонкостенного литья температура сплава при заливке должна быть выше, чем для массивных отливок. На жидкотекучесть оказывает влияние теплопроводность формы. Сплав, залитый в сухую песчаную форму, будет иметь большую жидкотекучесть, чем при заливке в сырую форму.

Мерой скорости, с которой материал формы может поглощать теплоту расплавленного металла, является коэффициент аккумуляции теплоты b_{ϕ} .

Увеличение b_{ϕ} приводит к возрастанию теплоотвода с поверхности расплава, что сокращает время затвердевания металла и тем самым снижает жидкотекучесть. Так, для чугунной формы b_{ϕ} на порядок выше, чем для сырой песчаной, — 14000 и 1150 Вт·с^{0,5}/(м²·К) соответственно. Жидкотекучесть ($l_{\text{ж}}$) можно оценить по теплофизическим свойствам металла и условиям литья:

$$l_{\text{ж}} = A\rho[c(t_{\text{ж}} - t_0) + L_{\text{кр}}]/t_{\text{м}} - t_{\phi}. \quad (22.6)$$

где $l_{\text{ж}}$ — длина спирали (контрольной части литой пробы), характеризующая жидкотекучесть; ρ — плотность сплава; c — теплоемкость сплава; $L_{\text{кр}}$ — удельная теплота кристаллизации (до момента нулевой жидкотекучести); $t_{\text{ж}}$ — температура перегрева металла (над температурой ликвидуса); t_0 — температура нулевой жидкотекучести; $t_{\text{м}}$ и t_{ϕ} — температура металла и формы соответственно; A — коэффициент, зависящий от условий литья. Из выражения (22.6) видно, что с повышением температуры литейной формы t_{ϕ} жидкотекучесть возрастает. Поэтому для повышения жидкотекучести расплава керамические и металлические литейные формы часто подогревают.

Характер течения расплава (ламинарный или турбулентный) должен оказывать влияние на жидкотекучесть. В канале диаметром D он оценивается значением числа Рейнольдса (Re):

$$Re = vD/\eta,$$

где v — скорость потока, м/с; η — кинематическая вязкость металла, m^2/c . При $Re > Re_{кр}$ течение жидкости становится неустойчивым, в потоке возникают завихрения, приводящие к увеличению гидравлического сопротивления течению и, как следствие, снижению жидкотекучести. Расчеты показывают, что турбулентное течение чугуна наступает при скорости в 1,5 раза большей, чем у стали.

Высокое качество поверхности отливки при литье под давлением, точность ее геометрических параметров и четкость оформления рельефа обеспечиваются гидродинамическим давлением (P_ϕ) расплава на стенку формы, возникающим в момент окончания движения расплава:

$$P_\phi = \rho_m v_\phi^2,$$

где ρ_m — плотность расплава; v_ϕ — скорость потока в форме.

Жидкотекучесть существенно зависит от склонности металла к окислению, сплошности и прочности оксидной пленки. При заливке формы оксидные пленки оказывают сопротивление течению расплава и замедляют заполнение им формы. В случае плавки и заливки металла в вакууме или защитной среде жидкотекучесть непрерывно возрастает с повышением температуры перегрева (t_n) расплава (рис. 22.5, кривая 1). При заливке на воздухе (рис. 22.5, кривая 2) температурная зависимость жидкотекучести имеет максимум ($t_{опт}$),

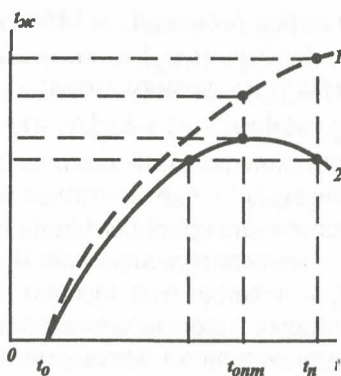


Рис. 22.5. Влияние температуры расплава на его жидкотекучесть:

1 — вакуум; 2 — воздух

соответствующий температуре, превышение которой вызывает активное окисление расплава с образованием оксидных пленок. В целях повышения жидкотекучести увеличивают температуру заливки металла или подогревают литейную форму.

Усадка — свойство сплава уменьшаться в объеме при затвердевании и охлаждении. Характеризуется изменением объемных и линейных размеров отливки, в соответствии с чем различают усадку линейную и объемную. Ее величину выражают обычно в процентах. С явлением усадки связаны основные технологические трудности производства фасонных отливок из-за образования в них усадочных раковин, пористости и трещин.

Усадочная раковина в отливках образуется в результате уменьшения объема жидкого металла при кристаллизации. При затвердевании объем металла уменьшается, а питания отливки жидким металлом не происходит, то есть не поступает дополнительной порции металла, которая компенсировала бы усадку. В результате в отливке образуется усадочная раковина. Усадочная пористость в отливках является следствием рассмотренных усадочных явлений, происходящих главным образом при затвердевании сплавов в интервале кристаллизации.

Различают линейную $\epsilon_{\text{лин}}$ и объемную ϵ_v усадки, %:

$$\epsilon_{\text{лин}} = ((l_{\text{ф}} - l_{\text{отл}}) / l_{\text{отл}}) \cdot 100; \quad (22.7)$$

$$\epsilon_v = ((V_{\text{ф}} - V_{\text{отл}}) / V_{\text{отл}}) \cdot 100, \quad (22.8)$$

где $l_{\text{ф}}$, $l_{\text{отл}}$, $V_{\text{ф}}$ и $V_{\text{отл}}$ — размеры и объемы формы и отливки соответственно.

Полная объемная усадка $\epsilon_{\text{уполн}}$ складывается из усадки сплава в жидком состоянии $\epsilon_{\text{ж}}$, при затвердевании $\epsilon_{\text{вз}}$ и в твердом состоянии $\epsilon_{\text{втв}}$; $\epsilon_v \approx 3\epsilon_{\text{лин}}$. Возникновение наружной усадки, усадочных раковин и пористости (скопление мелких пустот, заполненных газами) в отливке является результатом и проявлением объемной усадки металла.

Главное условие предупреждения образования в отливках усадочных раковин и пористости — непрерывный подвод жидкого металла к кристаллизующемуся сплаву. Для этого применяют прибыли (см. рис. 23.5) и обеспечивают направленное затвердевание отливки — снизу вверх в направлении к прибыли. Жидкий металл из прибыли питает отливку, а усадочная раковина образуется в прибыли, которую затем отделяют от отливки.

Свободному уменьшению размеров отливки оказывают сопротивление части формы и стержни (механическое торможение усадки).

Из-за затрудненной усадки — механического, термического или совместного торможения — в отливке возникают внутренние напря-

жения. Эти напряжения могут быть значительными и вызывать искривление (коробление) отливки. Если величина напряжений превысит предел прочности сплава при данной температуре, то в отливке возникнут трещины.

Для предупреждения трещин следует применять форму и стержни, обладающие хорошей податливостью, и обеспечивать равномерное охлаждение отливки в форме.

Склонность сплавов поглощать газы приводит к образованию в отливках газовой пористости и раковин. Газы попадают в сплав с шихтой из атмосферы и растворяются в нем. При понижении температуры растворимость газов в жидком металле уменьшается, и они выделяются из металла. Образующиеся в расплаве газовые пузырьки стремятся всплыть на поверхность. Однако понижение температуры приводит к увеличению вязкости сплава, что затрудняет всплывание пузырьков. Газовые пузырьки, оставшиеся в сплаве, образуют газовую пористость.

Литейные формы и стержни должны иметь минимальную газотворную способность и хорошую газопроницаемость.

Ликвацией называют неоднородность химического состава сплава в различных частях отливки. Ликвацию разделяют на дендритную и зональную. Дендритная ликвация характеризуется химической неоднородностью внутри зерна (дендрита), а при зональной ликвации неоднородность обнаруживается в отдельных частях объема отливки. Наиболее опасной для большинства сплавов является зональная ликвация, так как она не устраняется термической обработкой. При производстве отливок ликвация определяется двумя факторами: химическим составом сплава и условиями кристаллизации. Зональная ликвация усиливается при увеличении объема отливки и медленном затвердевании. Ликвация снижает прочностные свойства и общую работоспособность детали.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какова физическая природа кристаллизации металлов?
2. Каковы достоинства и недостатки изготовления заготовок с помощью литья?
3. Какими показателями определяются литейные свойства металлов и сплавов?
4. От каких факторов зависит жидкотекучесть металла?
5. Какие последствия вызывает усадка металла при литье?
6. Какие явления могут приводить к пористости и химической неоднородности в отливках?

Глава 23

ЛИТЬЕ В ПЕСЧАНЫЕ ФОРМЫ

23.1. ЛИТЕЙНАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНАСТКА

Для изготовления отливок применяют большое число различных приспособлений, которые называют *литейной оснасткой*.

В комплект литейной технологической оснастки для изготовления форм из формовочных смесей входят модели, модельные плиты, стержневые ящики и др.

Модели (рис. 23.1) — приспособления, при помощи которых в формовочной смеси получают отпечатки полости, соответствующие наружной конфигурации отливок.

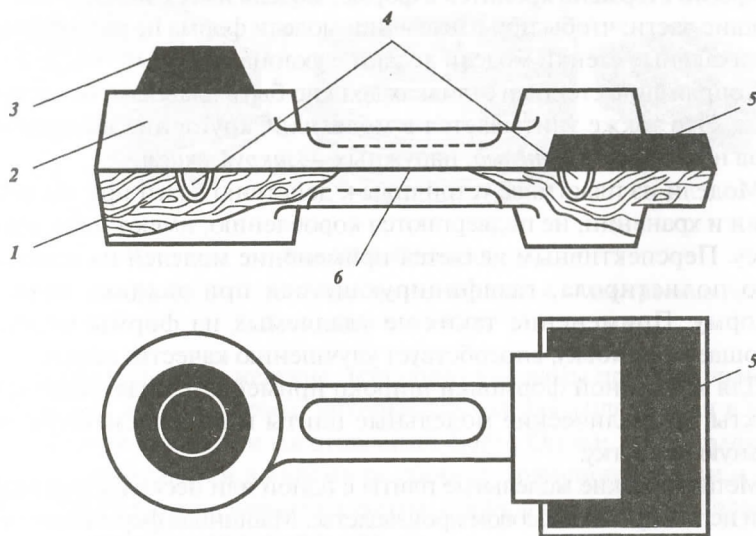


Рис. 23.1. Модель:

1 — нижняя половина; 2 — верхняя половина; 3, 5 — знаки; 4 — шипы; 6 — плоскость разъема

Отверстия и полости внутри отливок, а также иные сложные контуры получают при помощи стержней, устанавливаемых в формы.

Размеры модели делают больше, чем соответствующие размеры отливки, на величину линейной усадки сплава, которая для углеродистой стали составляет 1,8–2%, а для чугуна — 0,8–1,2%. Если от-

ливки подвергают механической обработке, то в соответствующих размерах модели учитывают размер припусков — слоя металла, удаляемого при механической обработке. Модели делают из древесины, металлических сплавов и пластмасс.

Деревянные модели изготавливают из плотной, хорошо просушенной древесины.

Преимущества деревянных моделей — дешевизна, простота изготовления, при больших размерах — небольшая масса; основной недостаток — недолговечность.

Металлические модели по сравнению с деревянными имеют значительно большую долговечность, высокую точность и чистую рабочую поверхность. Такие модели чаще всего делают из алюминиевых сплавов.

Для получения в форме отпечатков знаковых частей стержней, которыми стержень крепится в форме, модель имеет знаки — выступающие части; чтобы при извлечении модели форма не разрушалась, вертикальные стенки модели делают с уклонами.

Сопряжение стенок в отливках должно быть плавным, без острых углов. Это также учитывается в моделях. Скругление внутренних углов называется *галтелью*, наружных — *закруглением*.

Модели из пластмасс устойчивы к действию влаги при эксплуатации и хранении, не подвергаются короблению, имеют небольшую массу. Перспективным является применение моделей из вспененного полистирола, газифицирующегося при заливке металла в форму. Применение таких не удаляемых из формы моделей упрощает формовку, способствует улучшению качества литья.

Для машинной формовки широко применяют модельные комплекты: металлические модельные плиты и быстросменную модельную оснастку.

Металлические модельные плиты с одной или несколькими моделями используют в массовом производстве. Машинная формовка с применением металлических плит обеспечивает высокое качество отливок.

Стержневые ящики (рис. 23.2) для изготовления стержней должны обеспечивать равномерное уплотнение смеси и быстрое извлечение стержня. Как и модели, стержневые ящики имеют литейные уклоны, при назначении их размеров учитывают размер усадки сплава и (если требуется) припуска на механическую обработку. Стержневые ящики делают из тех же материалов, что и модели. По конструкции стержневые ящики могут быть неразъемными (рис. 23.2, б) и разъемными (рис. 23.2, в, г). Ящики для изготовления стержней из смесей горячего затвердевания имеют электрические или газовые нагреватели.

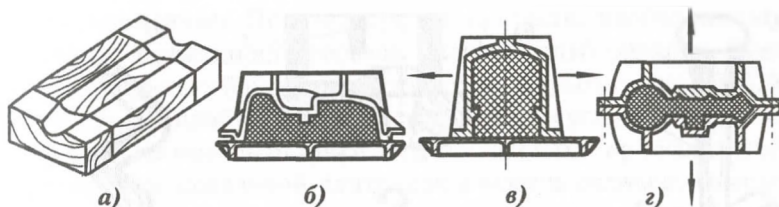


Рис. 23.2. Стержневые ящики:

a — деревянный (половина); металлические: *б* — неразъемный; *в* — с вертикальным разъемом; *г* — с горизонтальным разъемом

Для изготовления форм кроме модельных комплектов используют опочную оснастку: опоки, контрольные и центрирующие штыри, наполнительные рамки и другие приспособления (рис. 23.3).

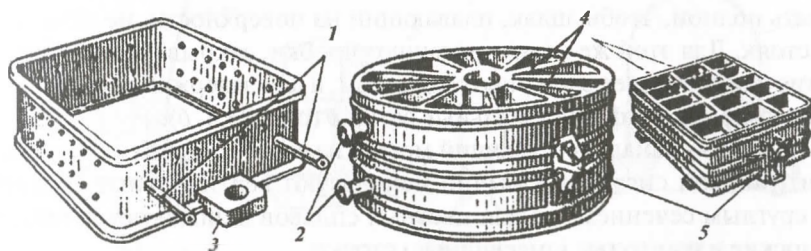


Рис. 23.3. Опоки:

1 — ручка; 2 — цапфа; 3 — центрирующее отверстие; 4 — внутренние ребра; 5 — скрепление опок

Опоками называют жесткие металлические рамы прямоугольной, круглой или другой формы, которые служат для уплотнения в них формовочной смеси при изготовлении форм. Опоки предохраняют форму от разрушения во время ее сборки, транспортировки и заливки. Опоки изготавливают из чугуна, стали, алюминиевых сплавов литыми, сварными или сборными.

Литниковые системы. Модели литниковой системы служат для образования в форме совокупности каналов, по которым металл из ковша поступает в полость литейной формы. Основными элементами литниковой системы (рис. 23.4, *a*) являются литниковая чаша (или воронка) 1, стояк 2, шлакоуловитель 3 и питатели 4.

Литниковая воронка (для мелких отливок) или чаша (для средних и крупных отливок) служат для приема металла из заливочного ковша, подачи металла в форму при постоянном напоре и задержания шлака. Во время заливки металла в форму воронка должна

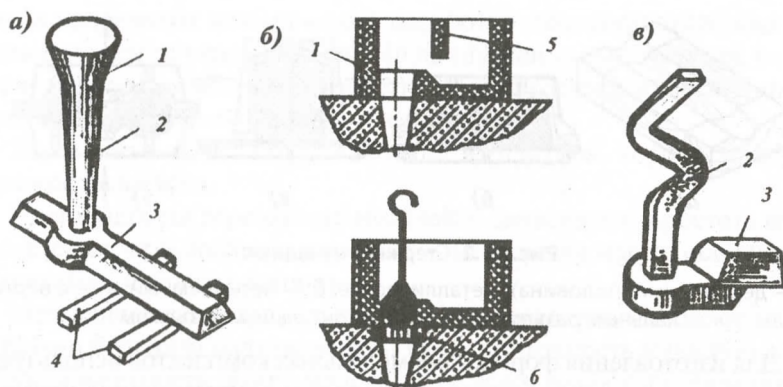


Рис. 23.4. Элементы литниковой системы

быть полной, чтобы шлак, плавающий на поверхности, не попадал в стояк. Для этой же цели применяют пробки, закрывающие отверстие чаши, пока ее заполняют металлом, а для задержания шлака — перегородки 5 и фильтровальные сетки 6 (рис. 23.4, б).

Стояк — канал, передающий металл из чаши к другим элементам литниковой системы. Обычно используют вертикальные стояки с круглым сечением, но для цветных сплавов используются также плоские и изогнутые (змеевидные) стояки.

Шлакоуловитель — горизонтальный канал, имеющий обычно сечение в виде трапеции. Служит для задержания шлака и передачи металла к питателям. Такой канал для стального литья обычно называют *литниковым ходом*, для чугуна — *шлакоуловителем*, для цветного литья — *коллектором*. Шлакоуловитель располагают чаще всего в верхней полуформе.

Питатели (литники) — каналы, предназначенные для передачи металла непосредственно в полость формы. Питатель в форме может быть один, а может быть и несколько питателей. Их выполняют обычно в нижней полуформе.

Для изготовления отливки применяются сужающиеся литниковые системы $F_{ст} > F_{шл} > F_{пит}$, где $F_{ст}$, $F_{шл}$ и $F_{пит}$ — площади сечения соответственно стояка, шлакоуловителя и питателя (питателей).

Сужающиеся литниковые системы лучше улавливают шлак и увеличивают литейную скорость прохождения металла через каналы литниковой системы. Их применяют при литье сплавов, мало склонных к окислению (чугуны, стали).

Прибыли и выпоры. Модель прибыли образует в форме дополнительные емкости для жидкого металла, которым питается отливка

при затвердевании. По конструкции прибыли, необходимые для устранения возможности образования усадочных раковин, бывают верхние открытые, боковые и сферические закрытые (рис. 23.5). Модели открытых прибылей делают съемными, их устанавливают перед формовкой на модель отливки; модели закрытых прибылей жестко монтируют на модельной плите, как и модель отливки. Открытые прибыли применяют для крупных ответственных отливок. Их можно доливать сверху горячим металлом. Модели выпоров образуют в форме каналы, которые соединяют полость формы с атмосферой и по которым вытесняются воздух и газы из полости формы. Выпоры при формовке обычно устанавливают на самых высоких частях модели или в местах предполагаемого скопления газов.

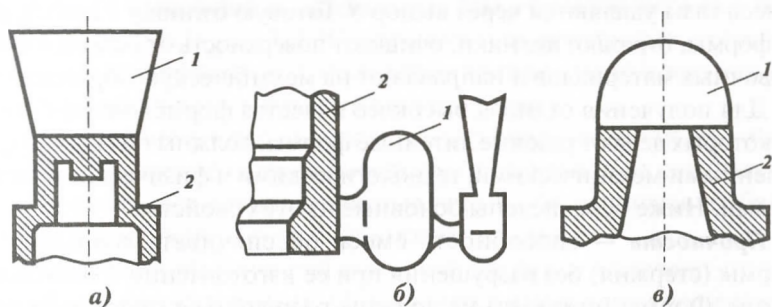


Рис. 23.5. Типы прибылей:

а — открытая; *б* — боковая; *в* — сферическая; 1 — прибыль; 2 — отливка

23.2. ФОРМОВОЧНЫЕ СМЕСИ

Для приготовления формовочных и стержневых смесей используют как природные, так и искусственные материалы.

В литейном производстве наиболее распространено получение литых деталей в разовых формах, изготовленных из песчано-глинистых и других смесей.

Разовая форма пригодна для получения только одной отливки. При выемке (выбивке) готовой детали форму разрушают. На рис. 23.6 приведена литейная форма для получения втулки. Она состоит из двух полуформ, полученных набивкой (уплотнением) формовочной смеси в металлические рамки — опоки. Для изготовления верхней и нижней полуформ используют разъемную модель 2. Отверстие в отливке получают с помощью стержня 4, отдельно изготовленного из стержневой смеси. При сборке формы стержень устанавливают в углубления (гнезда), образованные в форме знаками модели 3.

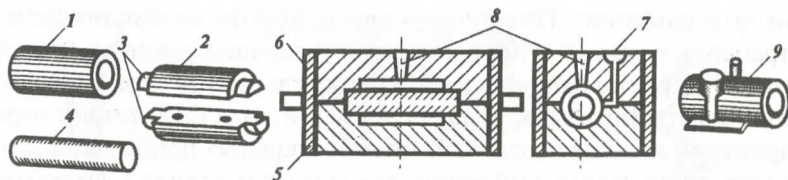


Рис. 23.6. Отливка детали в разовой форме. Литейная форма из формовочной смеси:

1 — отливаемая деталь; 2 — разъемная модель; 3 — стержневые знаки модели; 4 — стержень; 5, 6 — верхняя и нижняя опоки; 7 — литниковая система; 8 — выпор; 9 — отливка

Металл заливают через литниковую систему. Воздух и выделяющиеся газы удаляются через выпор 8. Готовую отливку 9 извлекают из формы, отрезают литники, очищают поверхность от остатков формовочных материалов и направляют на механическую обработку.

Для получения отливок высокого качества формовочные смеси, из которых делают разовые литейные формы, должны обладать определенными механическими, технологическими и физическими свойствами. Ниже перечислены основные из этих свойств.

Прочность — способность смеси обеспечивать сохранность формы (стержня) без разрушения при ее изготовлении и использовании. Формы (стержни) не должны разрушаться от толчков при сборке и транспортировке и должны выдерживать давление заливаемого металла.

Поверхностная прочность (осыпаемость) — сопротивление истирающему действию струи металла при его заливке.

Пластичность — способность смеси воспринимать очертания модели (стержневого ящика) и сохранять полученную форму.

Податливость — способность смеси сокращаться в объеме под действием усадки сплава. При недостаточной податливости в отливке возникают большие напряжения, которые могут привести к образованию трещин.

Текучесть — способность смеси обтекать модели при формовке, заполнять полость стержневого ящика. Термохимическая устойчивость (непригораемость) — способность смеси выдерживать высокую температуру заливаемого сплава без оплавления или химического взаимодействия с ним.

Гигроскопичность — способность смеси после сушки поглощать влагу из воздуха в течение длительного времени.

Долговечность — способность смеси сохранять свои свойства при многократном использовании.

Технологические свойства не могут быть выражены количественно, их оценивают по экспериментальным данным.

Газопроницаемость — способность пропускать газы через стенки формы вследствие пористости — одно из важнейших свойств формовочных смесей. При недостаточной газопроницаемости в теле отливки могут образовываться газовые пузыри — раковины.

Теплофизические свойства — теплопроводность, удельная теплоемкость — существенно влияют на скорость кристаллизации металла и его последующего охлаждения и тем самым на структуру и свойства отливок.

Песок — основной исходный материал для всех формовочных и стержневых смесей. Наиболее часто применяют кварцевый песок, в основном состоящий из кремнезема SiO_2 , обладающего высокой огнеупорностью ($t_{\text{пл}} = 1713^\circ\text{C}$), прочностью, твердостью, термохимической устойчивостью. Смесь для повторного использования необходимо обогащать добавками свежего песка.

Мелкозернистые пески используют для мелкого литья, что обеспечивает получение гладкой поверхности отливки. Для крупных отливок применяют крупнозернистые пески, обеспечивающие более высокую газопроницаемость формовочных смесей.

Глина — второй основной исходный материал в песчано-глинистых формовочных смесях. Она является связующим веществом, обеспечивающим их прочность и пластичность.

Чем больше воды удерживает на поверхности глина, тем выше ее связующая способность, а также пластичность формовочной смеси. При нагревании (сушке) по мере удаления влаги прочность смеси возрастает.

Песчано-глинистые смеси по характеру использования делят на облицовочные, наполнительные и единые.

Обычно связующие вводят в формовочные и стержневые смеси в небольших количествах (1,5–3%).

Облицовочная смесь — более качественная, с высокой прочностью, газопроницаемостью и другими свойствами. Для ее получения берут большее количество свежих материалов (песка, глины). При формовке такую смесь наносят на модель, создавая в литейной форме поверхностный слой толщиной 40–100 мм. Остальной объем формы заполняют *наполнительной смесью*, менее качественной, в основном состоящей из оборотной смеси (смеси, бывшей в употреблении). Оборотные смеси используют для уменьшения расхода свежего песка и глины.

Единые формовочные смеси применяют в массовом производстве, при машинной формовке для заполнения всего объема формы. Эти

смеси, как и облицовочные, непосредственно соприкасаются с расплавленным металлом и должны обладать высокими свойствами.

23.3. СТЕРЖНЕВЫЕ СМЕСИ

При заливке формы стержни в большинстве случаев находятся в тяжелых условиях, испытывая значительное термическое и механическое воздействие расплавленного литейного сплава. Поэтому к стержневым смесям предъявляют более высокие требования по прочности и другим свойствам, чем к формовочным. В зависимости от конфигурации, толщины сечения, размещения в форме стержни делят на пять классов.

В соответствии с требованиями разработана многочисленная рецептура стержневых смесей. Для стержней I класса наполнителем является свежий песок с минимальным содержанием глинистых веществ. В качестве связующих используют, например, раствор растительных масел и канифоли в уайт-спирите с добавками сульфитно-спиртовой барды или другие аналогичные связующие вещества; для стержней менее ответственного назначения применяют смесь песка и глины (3–5%) с добавками сульфитно-спиртовой барды, древесного пека и т.п. Стержни IV, V классов можно изготавливать из смесей, содержащих кроме свежего песка 20–60% оборотной смеси, до 10% глины и добавки древесного пека.

Требуемая прочность и другие свойства стержневых смесей обеспечиваются сушкой в конвейерных печах (сушилах), инфракрасными лучами и т.д. В соответствии с природой связующего температура сушки составляет 160–250 °С (иногда до 300–350 °С). Продолжительность сушки зависит от размеров сечения и других условий и колеблется в широких пределах — от 40–60 мин до нескольких часов. Для изготовления стержней очень широко применяют самотвердеющие специальные смеси.

23.4. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ФОРМОВОЧНЫЕ СМЕСИ

Использование специальных формовочных смесей для изготовления форм и стержней позволяет наиболее эффективно применять современные средства механизации и автоматизации, исключить ручной труд, существенно повысить производительность труда и улучшить качество отливок.

Как правило, в специальных формовочных смесях основным компонентом является кварцевый песок с минимальным содержа-

нием глинистых веществ. В качестве связующих используют синтетические смолы, жидкое стекло; в смеси вводят катализаторы.

Одним из основных требований к специальным формовочным смесям является отсутствие или минимальное количество токсичных выделений из смол (связующих, катализаторов) в условиях производства.

Пластичные самотвердеющие смеси (ПСС) — это смеси на основе жидкого стекла. Приготавливают их по двухстадийной технологии. В центральном смесеприготовительном отделении приготавливают базовую смесь, состоящую из 92% песка; 5% глины; 3% молотого угля; 5,5% жидкого стекла. Влажность смеси — 3,5%. Такая смесь имеет высокую пластичность.

После изготовления формы из нее можно сразу удалять модель, через 30 мин — окрашивать, а через 4–6 ч — заливать форму металлом. Это важно при машинной формовке в условиях серийного производства.

Смеси горячего отверждения для стержней принципиально не отличаются от используемых смесей для сухих стержней и форм, также упрочняемых при нагреве, продолжительность которого иногда составляет несколько часов. Данные стержневые смеси отверждаются за 1–2 мин при нагреве смеси до 250–280 °С в горячих стержневых ящиках с электрическими или газовыми нагревателями. Такой способ дает возможность эффективно автоматизировать процесс литья, исключив из него сушку стержней в печах. Поэтому эти смеси нашли широкое применение в цехах массового производства. Наполнителем в смесях горячего отверждения является кварцевый песок. В качестве связующих обычно используют карбамидно-фурановые и другие смолы с добавками соответствующих катализаторов, обеспечивающих быстрое отверждение стержня при невысоком нагреве.

Жидкие самотвердеющие смеси (ЖСС) для изготовления форм и стержней нашли очень широкое применение в литейном производстве. В отличие от других формовочных смесей формы и стержни из ЖСС изготавливают не методами уплотнения, а путем заливки. Смесью затвердевает через 30–40 мин.

Жидкие самотвердеющие смеси имеют различный состав, основным наполнителем в смесях является кварцевый песок (95–97%). В качестве связующих и веществ, обеспечивающих затвердевание смеси на воздухе, обычно используют жидкое стекло, феррохромовый шлак, иногда цемент с добавками соответствующих катализаторов.

Смесь начинает отверждаться сразу же после введения феррохромового шлака; при приготовлении смеси его загружают в смеситель в последнюю очередь.

Цементные жидкоподвижные смеси содержат: кварцевый песок — 92%; цемент — 8%. Воду — 10% и катализатор — 2% добавляют сверх 100%. Время затвердевания смеси до извлечения модели — 40–50 мин. Через 3 ч форму окрашивают противопожарной краской, через 4–6 ч заливают металл.

Использование ЖСС исключает формовку, применение формовочных машин, значительно упрощает технологию изготовления форм и стержней, снижает трудоемкость, повышает качество отливок и производительность труда. Холоднотвердеющие смеси (ХТС) изготавливают из песка с добавками синтетических смол (полимеров), катализаторов и др. Продолжительность отверждения некоторых смесей до извлечения моделей из формы (стержня из ящика) составляет от 30 с до 1 мин; дальнейшее отверждение происходит в течение нескольких часов.

Одна из особенностей технологии состоит в том, что холоднотвердеющие смеси имеют живучесть 20–30 мин (иногда — до 5 мин). Использование холоднотвердеющих смесей обеспечивает высокую точность и чистоту поверхности отливок, что существенно сокращает их последующую механическую обработку. Эти смеси все шире применяют в литейном производстве для изготовления не только мелких и средних, но и крупных форм и стержней.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое литейная технологическая оснастка?
2. Из каких элементов состоит литниковая система?
3. Какие требования предъявляют к формовочным смесям?
4. Перечислите основные компоненты формовочных и стержневых смесей.

Глава 24

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВИДЫ ЛИТЬЯ

24.1. ЛИТЬЕ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ

Литейная форма представляет собой неразъемную тонкостенную керамическую оболочку, изготовленную из мелкозернистых формовочных материалов по разовым (выплавленным или растворяемым) моделям. Модели изготавливают обычно в металлических пресс-формах путем заливки или запрессовки в них модельного состава (рис. 24.1).

Пресс-форма (рис. 24.1, б) чаще всего состоит из двух частей — матриц с горизонтальным или вертикальным разъемом. Точная фиксация половин пресс-формы при сборке обеспечивается направляющими штырями. Отверстия в модели обычно получают с помощью подвижных или неподвижных металлических стержней.

В пресс-форме предусматривается литниковая система для заполнения ее модельным составом. Пресс-формы выполняются многоместными и одностыми. Модельные составы, применяемые для изготовления разовых моделей, многочисленны, но их можно подразделить на следующие группы: легкоплавкие на основе воскообразных веществ; тугоплавкие на основе пластмасс; растворимые. В качестве исходных материалов для приготовления модельных составов используются: парафин — продукт возгонки нефти, бурого угля, горючих сланцев; стеарин — продукт переработки растительных и животных жиров; буроугольный и торфяной воск — продукты переработки бурого угля и торфа; церезин — смесь твердых высокомолекулярных углеводов; канифоль — продукт хвойных пород дерева; полистирол — твердое бесцветное вещество с аморфной структурой (получают полимеризацией стирола); карбамид — техническая мочевина и ряд других веществ.

Воскообразные модельные составы получают обычно из парафина и стеарина. Парафино-стеариновый (ПС) двухкомпонентный состав приготавливают в любом соотношении. Наиболее часто применяют состав ПС50-50, содержащий по 50% каждого компонента. Модельные составы ПС имеют невысокую температуру плавления (54–55 °С), достаточно хорошую жидкотекучесть и пригодны для многократного использования (возврат модельного состава равен 90–98%).

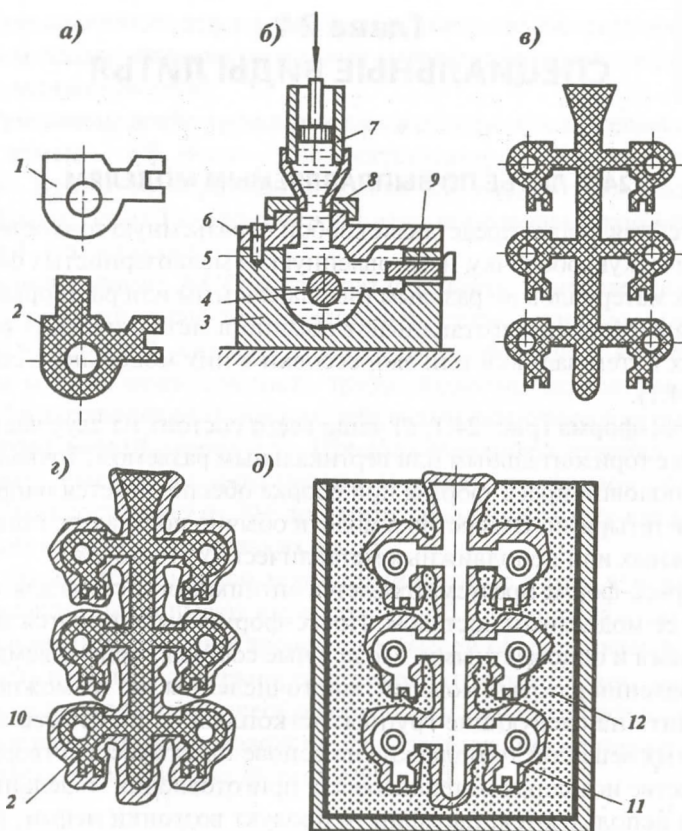


Рис. 24.1. Схема процесса литья по выплавляемым моделям:

а — деталь и модель; б — изготовление модели в пресс-форме; в — сборка моделей в блок; г — образование оболочки на блоке моделей; д — подготовка формы к заливке; 1 — деталь; 2 — модель; 3, 6 — нижняя и верхняя матрицы пресс-формы; 4, 9 — металлические подвижные стержни; 5 — направляющий штырь; 7 — поршень; 8 — модельная масса; 10 — оболочка; 11 — полость формы; 12 — наполнитель

Недостатками модельных составов ПС являются низкая прочность и твердость и большая нестабильная усадка.

Модели крупногабаритных и тонкостенных отливок изготавливают из более тугоплавких модельных составов. К ним относятся модельный состав КПсЦ50-30-20, содержащий 50% канифоли; 30% полистирола и 20% церезина. Обладает высокой прочностью, твердостью и стабильной усадкой; температура плавления состава — около 180 °С. К недостаткам КПсЦ можно отнести сложность при-

готовления, низкую жидкотекучесть и высокую вязкость. Вследствие низкой жидкотекучести при запрессовке КПСЦ требуется повышенное давление. Из-за высокой вязкости этот модельный состав плохо выплавляется из формы, большая часть его остается в форме и выжигается при ее прокатке, поэтому только 30–40% модельного состава идет на повторное использование.

Растворимые модельные составы приготавливают на основе карбамида с добавкой до 2% борной кислоты (например, состав К6Бк98-2). Температура плавления этого состава 120–125 °С. Карбамидные модели обладают высокими прочностью, твердостью и практически не имеют усадки. Недостатками состава К6Бк98-2 являются гигроскопичность и плохая спаиваемость, что ограничивает применение состава для сложных моделей, изготавливаемых по частям.

Процесс изготовления моделей состоит в заполнении подготовленной пресс-формы модельным составом, выдержке для затвердевания модели, извлечении модели из пресс-формы и охлаждении модели на воздухе или в проточной воде до окончания усадки.

К крупным моделям припаивают элементы литниковой системы, а мелкие модели объединяют в блоки с общей литниковой системой (см. рис. 24.1, в).

Для получения тонкостенной керамической формы по изготовленным моделям используют формовочную смесь в виде жидкой суспензии, состоящую в основном из пылевидного кварца SiO_2 и связующего, например гидролизованного раствора этилсиликата $(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_4\text{Si}$. Жидкую формовочную смесь (обмазку) наносят на блок моделей, многократно окуная его в ванну с обмазкой.

Обсыпка блока производится в пескосыпах или окутанием в псевдокипящий слой песка (песчинки находятся во взвешенном состоянии под действием сжатого воздуха). Каждый слой покрытия на этилсиликате сушат парами воздуха или аммиака. Для образования оболочки на блоке моделей (см. рис. 24.1, г) необходимой толщины и прочности на блок наносят четыре, пять, шесть и более слоев обмазки.

Удаление моделей из полученной неразъемной керамической формы производят выплавлением горячей водой, паром, горячим воздухом или растворением в воде. Выбор способа удаления моделей в основном определяется модельным составом. Формы для отливок по выплавляемым моделям применяются без наполнителей и с наполнителями, упрочняющими формы (см. рис. 24.1, д). Наполнителями могут быть сыпучие огнеупорные материалы или специальные смеси — «жидкие наполнители».

Прокалку формы при температуре порядка 950 °С осуществляют с целью удаления остатков модельного состава и окончательного упрочнения формы за счет спекания частиц связующего с частицами пылевидного огнеупорного материала. Кроме того, форма после прокалики становится газопроницаемой.

Заливку металла производят чаще всего в горячие формы сразу же после прокалики. Формы для толстостенных отливок перед заливкой охлаждают.

После выбивки отливок из формы производят их очистку от керамической оболочки на пневматических установках. Затем от отливок отделяют литниковую систему, подвергают их окончательной очистке в кипящем растворе щелочей и промывают водой.

С целью улучшения структуры и механических свойств отливок они проходят термическую обработку.

Способ литья по выплавляемым моделям имеет следующие характерные особенности: разовая легкоплавкая модель не имеет разъема и знаковых частей и строго соответствует конфигурации отливки; формовочная смесь в виде жидкой суспензии хорошо смачивает модель при изготовлении неразъемной формы. Это обеспечивает получение гладкой поверхности формы и высокую точность ее размеров. Заливка металла в горячие формы дает возможность изготавливать тонкостенные отливки сложной конфигурации, причем из сплавов с низкими литейными свойствами.

Способом литья по выплавляемым моделям изготавливают детали сложной конфигурации из сталей, цветных металлов, тугоплавких и трудно обрабатываемых сплавов. Масса таких деталей может быть от нескольких граммов до 500 кг, толщина стенки — 1–3 мм.

24.2. ЛИТЬЕ В ОБОЛОЧКОВЫЕ ФОРМЫ

Литейная форма представляет собой разъемную тонкостенную оболочку, изготовленную из песчано-смоляных смесей по горячей металлической модели.

Формовочная смесь для оболочковых форм состоит из мелкозернистого кварцевого песка (или другого огнеупорного материала), синтетической термореактивной или термопластичной смолы, которая является связующим, и различных технологических добавок.

Способ изготовления оболочек основан на специфических свойствах смол. При комнатной температуре смолы могут быть жидкими или твердыми. При нагревании до 100–120 °С жидкие смолы становятся еще более жидкими, твердые смолы расплавляются; и в том

и в другом случае они обволакивают песчинки огнеупорного материала. При дальнейшем нагревании до 200–250 °С термореактивные смолы необратимо твердеют. Для перевода термопластичных смол в твердое необратимое состояние в них добавляют отвердители.

Формовочные смеси применяют двух видов: неплакированные и плакированные. Неплакированная смесь содержит кварцевый песок и смолу в виде порошка, равномерно перемешанную с песком. Плакированная смесь специально подготавливается и содержит смолу в виде тонкой пленки, покрывающей поверхность песчинок. Такая смесь обладает лучшими свойствами (прочностью, газопроницаемостью и др.).

Модельная оснастка для изготовления оболочковых форм состоит из двух модельных плит (верхней и нижней), стержневых ящиков и вспомогательных приспособлений. Модельные плиты изготавливают из стали, чугуна или алюминиевых сплавов и снабжают толкателями для снятия оболочек. На рабочие поверхности модельных плит и стержневых ящиков наносят разделительную жидкость для предупреждения прилипания оболочек.

Модельная оснастка нагревается в электрических печах или от плит с электронагревателями. На рис. 24.2, а показана схема на-

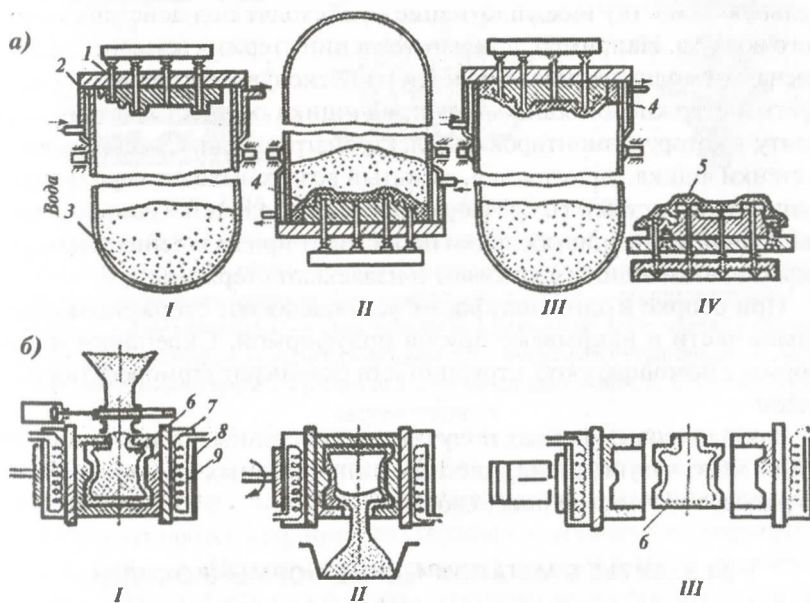


Рис. 24.2. Схема процесса изготовления оболочковой формы (а) и оболочкового стержня (б)

сыпного, или бункерного, способа изготовления оболочковых форм. Модельную плиту 1 нагревают до температуры 200–250 °С и закрепляют на бункере 2 с песчано-смоляной смесью 3. При повороте бункера на 180 °С смесь падает на модельную плиту и уплотняется. Иногда для лучшего уплотнения смеси используют вибрацию или подпрессовку. Время контакта песчано-смоляной смеси с нагретой модельной плитой составляет 10–30 с. Под действием тепла модельной плиты слой 4 смеси, прилегающей к ней, прогревается на глубину 6–20 мм.

Смола сначала размягчается, склеивает частицы песка, а затем затвердевает, образуя на модели полутвердую оболочку. Часть смеси, которая не успевает прогреться, сыпают в бункер при его повороте в исходное положение. Оболочку вместе с модельной плитой помещают в печь, где при температуре 300–350 °С выдерживают 1–3 мин. При этом смола переходит в твердое необратимое состояние и оболочка приобретает необходимую прочность. Твердая оболочка 5 снимается с плиты толкателями. Так же изготавливают и вторую полуформу.

Кроме рассмотренного способа изготовления оболочек широко применяют пескодувный способ, при котором подача смеси на модельную оснастку и ее уплотнение происходят под действием сжатого воздуха. Например, при изготовлении стержня (см. рис. 24.2, б) песчано-смоляная смесь подается из пескодувной головки в подогретый стержневой ящик. Подогрев ящика осуществляется через плиту, в которую вмонтированы электронагреватели. Смесь, ударяясь о стенки ящика, уплотняется, а сжатый воздух выходит через вентиляционную систему. После формирования оболочки излишек смеси высыпают. Твердение оболочки происходит при дальнейшем нагреве ящика. Затем ящик раскрывают и извлекают стержень.

При сборке в одну полуформу устанавливают стержень на знаковые части и накрывают другой полуформой. Скрепляют полуформы с помощью скоб, струбцин или склеивают термореактивным клеем.

В оболочковых формах получают тонкостенные отливки массой до 100 кг из чугуна, стали, цветных и специальных сплавов, точные по размерам, с чистой поверхностью.

24.3. ЛИТЬЕ В МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ФОРМЫ (КОКИЛИ)

Металлические формы — кокили являются литейными формами многократного использования. Их изготавливают в основном

из стали и чугуна. По конструкции металлические формы бывают неразъемными (рис. 24.3, а) и разъемными. Неразъемные кокили применяют для отливок, конструкция которых обеспечивает свободное удаление их из формы вместе с литниковой системой при повороте формы на 180 градусов. Разъемные кокили делают створчатыми (рис. 24.3, б), с горизонтальной плоскостью разъема (рис. 24.3, в), с вертикальной плоскостью разъема (рис. 24.3, д, е) и более сложных конструкций.

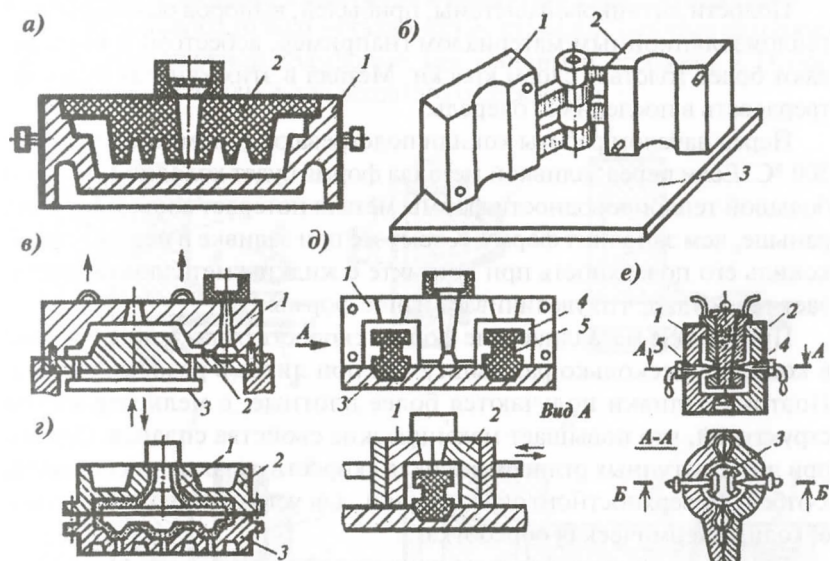


Рис. 24.3. Примеры конструкций кокилей:

а — неразъемный: 1 — кокиль; 2 — песчаный стержень; б — створчатый: 1, 2 — матрицы кокиля; 3 — плита; в — с горизонтальным разъемом: 1 — верхняя матрица; 2 — нижняя матрица; 3 — плита толкателей; г — облицованный: 1 — оболочка; 2, 3 — матрица; д — с вертикальным разъемом: 1, 2 — левая и правая матрицы; 3 — плита; 4 — полость формы; 5 — песчаный стержень; е — разъемный с металлическими стержнями: 1, 2 — матрицы кокиля; 3, 4, 5 — металлические стержни

Внутренняя полость кокиля (рабочая поверхность) оформляет наружную конфигурацию отливки. Отверстия, пазы и полости в отливке выполняются при помощи стержней — обычных песчаных или металлических. При этом конструкция металлических стержней должна обеспечивать их свободное извлечение из формы после затвердевания отливки. Для того чтобы можно было извлечь сложный металлический (рис. 24.3, е) стержень, его делают составным.

Металлическая форма не обладает газопроницаемостью, поэтому конструкция формы должна обеспечивать удаление воздуха и газов при ее заливке. В форме наряду с выпорами предусматривают вентиляционные пробки (венты) и тонкие риски по плоскости разъема (рис. 24.3, в).

Металлическая форма неподатлива и оказывает сопротивление усадке отливки при затвердевании. Это вызывает дополнительные напряжения в отливке и затрудняет извлечение ее из формы.

Полости литниковой системы, прибылей, выпоров облицовывают теплоизоляционным материалом (например, асбестом) и окрашивают более толстым слоем краски. Металл в этих каналах будет затвердевать в последнюю очередь.

Перед началом работы кокили подогревают до температуры 200–300 °С. Если перед заливкой металла форма будет холодной, то из-за большой теплопроводности формы металл потеряет жидкотекучесть раньше, чем заполнит форму. К тому же при заливке в неподогретый кокиль его поверхность при контакте с жидким металлом испытывает термоудар, что увеличивает износ формы.

При литье в металлические формы скорость охлаждения отливки в кокиле в несколько раз выше, чем при литье в разовые формы. Поэтому отливки получаются более плотные, с мелкозернистой структурой, что повышает механические свойства сплавов. Однако при литье чугуновых отливок высокая скорость охлаждения приводит к отбелу поверхностного слоя отливки, для устранения которого необходима термическая обработка.

Точность размеров и чистота поверхности отливок при литье в кокиль выше, чем при литье в песчаные формы. Это позволяет в 2–3 раза снизить припуск на механическую обработку.

Литье в кокиль является производительным процессом: трудоемкость изготовления отливок в кокилях меньше, чем при литье в песчаные формы, условия труда лучше. Однако из-за высокой стоимости изготовления металлической формы литье в кокиль экономически целесообразно только в серийном и массовом производствах.

Разновидностью литья в кокиль является способ изготовления отливки в облицованных металлических формах (см. рис. 24.3, г). Внутреннюю поверхность кокиля облицовывают тонкостенной оболочкой из песчано-смоляной смеси. Форма приобретает податливость и газопроницаемость. Кроме того, оболочка уменьшает отвод теплоты от залитого металла, что позволяет получить чугуновые отливки без отбела. Стойкость таких кокилей при заливке чугуна и стали значительно увеличивается.

24.4. ЛИТЬЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Литейная форма представляет собой сложную разъемную металлическую форму, называемую *пресс-формой*. Ее изготавливают из легированной и закаленной стали. Рабочую полость пресс-формы механически обрабатывают с высокой точностью размеров и чистотой поверхности.

Пресс-форма (рис. 24.4, а) состоит из неподвижной матрицы 1 и подвижной матрицы 3. Для образования полостей и отверстий в отливке используют только металлические стержни, которые находятся обычно в подвижной полуформе, как, например, стержень 2. Пресс-форма имеет каналы 6 для водяного охлаждения.

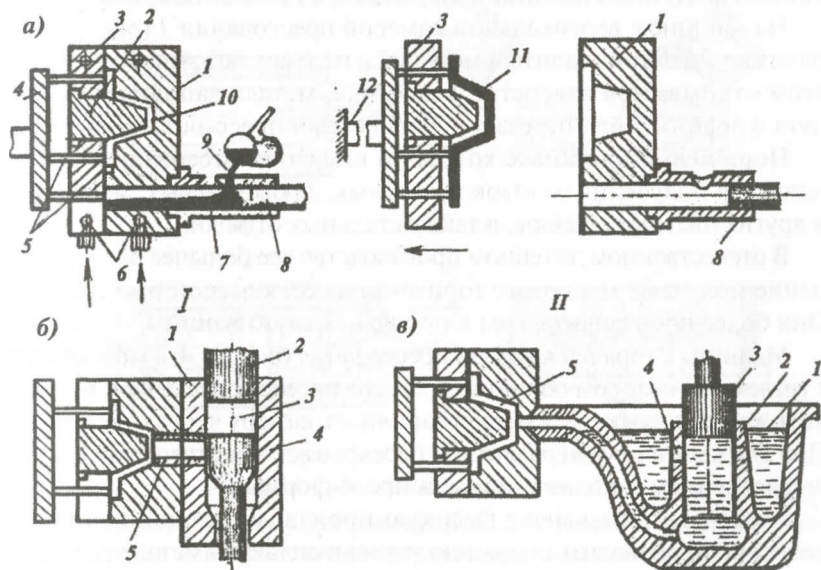


Рис. 24.4. Схема литья под давлением на машинах:

а — с холодной горизонтальной камерой; б — с холодной вертикальной камерой; в — с горячей вертикальной камерой

Для извлечения отливки из формы предусмотрены толкатели 5, закрепленные на плите толкателей 4.

Машины для литья под давлением бывают поршневые и компрессорные. Наибольшее распространение получили поршневые машины с холодной и горячей камерами прессования.

Поршневые машины с холодной камерой прессования подразделяют на машины с горизонтальной (рис. 24.4, а) и вертикальной (рис. 24.4, б) камерами.

Перед заливкой пресс-форму подогревают и наносят смазку на ее рабочие поверхности, камеры прессования 7 и на пресс поршня 8 (рис. 24.4, а). В камеру прессования (позиция I) заливают мерную порцию сплава 9. Пресс-поршень 8 перекрывает заливочное отверстие, создает давление в камере прессования, и сплав с большой скоростью заполняет полость формы 10. После затвердевания сплава пресс-форма раскрывается — отходит подвижная часть формы вместе с отливкой, плунжер возвращается в исходное положение. Плита толкателей перемещается вместе с пресс-формой до упора 12 (позиция II). При дальнейшем движении пресс-формы толкатели снимают отливку 11 со стержня 2, и она поступает в контейнер. Пресс-форму обдувают сжатым воздухом, смазывают, закрывают, и процесс повторяется.

На машине с вертикальной камерой прессования 1 (рис. 24.4, б) плунжер 2 давит на залитый металл 3 и перемещает вниз пята 4. При этом открывается отверстие 5 литника, металл заполняет форму, пята 4 поднимается, отрезает и выталкивает пресс-остаток металла.

Поршневые машины с холодной камерой прессования применяют для получения отливок из медных, алюминиевых, магниевых и других цветных сплавов, а также стальных отливок.

В отечественном литейном производстве все большее распространение получают машины с горизонтальной камерой прессования. Они более производительны и проще в обслуживании.

Машины с горячей камерой прессования (рис. 24.4, в) имеют печь с тиглем 1, в котором образована камера прессования 2. При верхнем положении плунжера 3 металл заполняет камеру через отверстия 4. При движении плунжера вниз он перекрывает эти отверстия, и сплав под давлением заполняет полость пресс-формы.

Такие машины имеют высокую производительность, так как не нужно производить операцию заливки сплава — металл сам заливается в камеру при обратном ходе плунжера. Поэтому большинство машин работает в автоматическом режиме. Производительность может достигать до 3000 и более отливок в час. Машины с горячей камерой прессования используют в основном для литья легкоплавких сплавов (цинковых, свинцово-сурьмянистых и др.).

Применение металлической формы и давления на заливаемый металл позволяет получить сложные отливки высокой точности с чистой поверхностью и минимальными припусками на механическую обработку. Благодаря давлению возможно получение отливок со стенками толщиной 1–1,5 мм. Прочность отливок выше, чем при литье в песчаные формы. Но пластические свойства отливок снижаются из-за низкой газопроницаемости формы.

24.5. ЦЕНТРОБЕЖНОЕ ЛИТЬЕ

Литейными формами служат обычно металлические формы, изготовленные из стали или чугуна. При центробежном литье металл заливают во вращающуюся форму, установленную на центробежной машине. В некоторых случаях форма приводится во вращение после заливки. Вращение формы осуществляется вокруг горизонтальной или вертикальной оси.

Машины с горизонтальной осью вращения (рис. 24.5, а) применяют для отливки чугунных и стальных труб, втулок и других отливок тел вращения.

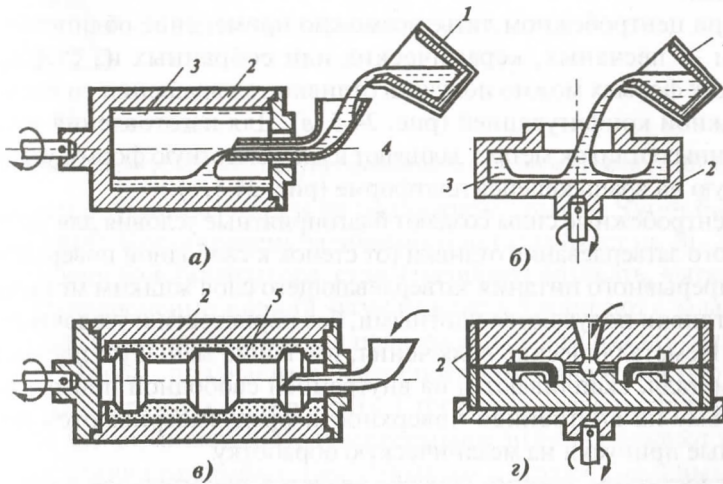


Рис. 24.5. Схемы центробежного литья:

а — с горизонтальной осью вращения формы; б — с вертикальной осью вращения формы; в — в облицованные формы; г — в песчаные формы; 1 — ковш; 2 — форма; 3 — металл; 4 — желоб; 5 — облицовка

Жидкий металл из ковша по желобу заполняет вращающуюся форму. После затвердевания сплава и остановки машины отливку клещами извлекают из формы.

На машинах для литья труб большой длины предусмотрены постепенное выдвижение желоба из формы или отход формы от желоба с целью ее равномерного заполнения.

На машинах с вертикальной осью вращения (рис. 24.5, б) металл из ковша 1 заливают во вращающуюся форму 2. Под действием центробежных сил металл 3 прижимается к боковым стенкам формы. После затвердевания отливки вращение формы прекращают и от-

ливку извлекают. В отливке под влиянием веса металла наблюдается небольшая разностенность (внизу стенка отливки толще, чем сверху). Поэтому этот способ применяют для изготовления отливок небольшой высоты — втулок, колец, зубчатых колес, фланцев и т.п.

Металлические формы при центробежном литье, так же как и при кокильном, предварительно подогревают и на поверхность наносят защитные покрытия. Для форм, вращающихся горизонтально, можно применять сыпучие покрытия, которые вводят в форму перед заливкой. Под действием центробежных сил порошок покрытия равномерно распределяется по всей цилиндрической поверхности формы.

При центробежном литье возможно применение облицованных форм — песчаных, керамических или собранных из стержней. В таких формах можно получать отливки тел вращения со сложной наружной конфигурацией (рис. 24.5, *в*). Для изготовления мелких фасонных отливок металл заливают в многоместную форму, установленную на вращающейся платформе (рис. 24.5, *г*).

Центробежные силы создают благоприятные условия для направленного затвердевания отливки (от стенок к свободной поверхности) и непрерывного питания затвердевающего слоя жидким металлом.

Отливки получаются плотными, без пористости и усадочных пустот. Неметаллические включения, имеющие меньшую плотность, чем металл, скапливаются на внутренней свободной поверхности. Поэтому на внутренней поверхности предусматриваются повышенные припуски на механическую обработку.

Недостатком данного способа является значительная ликвация. С увеличением скорости вращения формы ликвация усиливается.

Центробежным способом чаще всего получают отливки из чугунов, стали и цветных металлов, имеющие форму тел вращения, и реже — фасонные.

24.6. СПЕЦИАЛЬНЫЕ СПОСОБЫ ЛИТЬЯ

Полунепрерывное литье чугунных труб и втулок — один из перспективных высокопроизводительных способов, позволяющий получать изделия диаметром до 1000 мм и длиной до 10 м, что невозможно при других способах. В установке для полунепрерывного литья труб (рис. 24.6, *а*) жидкий чугун заливают в кольцевой зазор, образованный внутренней стенкой водоохлаждаемого кристаллизатора 1 и водоохлаждаемым металлическим стержнем 2. Перед началом заливки этот кольцевой зазор плотно закрыт металлическим

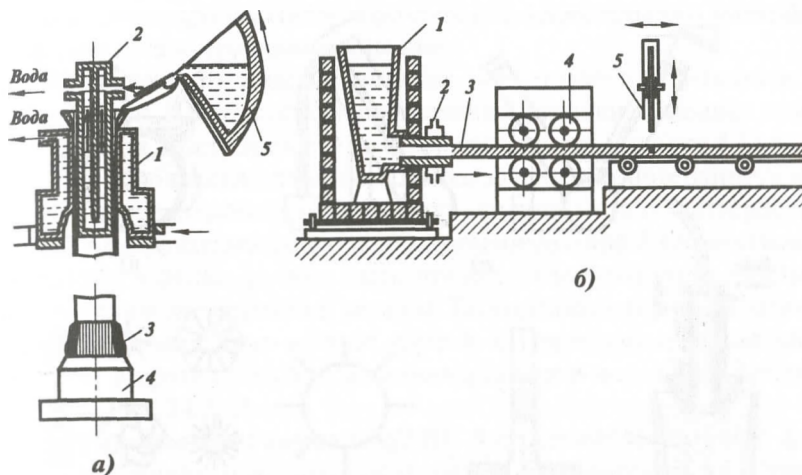


Рис. 24.6. Схема установки полунепрерывного (а) и непрерывного (б) литья стержнем 3, установленным на подвижном столе 4. Чугун быстро затвердевает. Когда уровень заливаемого металла будет на 20–25 мм ниже уровня кристаллизатора, стол 4 начинают опускать, вытягивая трубу. Одновременно жидкий чугун из ковша 5 заливают с заданной скоростью в кристаллизатор для поддержания в нем нужного уровня металла. Трубы, получаемые этим способом, имеют чистую внутреннюю и наружную поверхность. Структура сплава таких труб получается мелкозернистой. Полунепрерывное литье используют также для получения квадратных, шестигранных и других фасонных профилей из чугуна, бронз, латуней и других сплавов.

На рис. 24.6, б показан метод **непрерывного литья** заготовок. Жидкий металл, поступающий из тигля 1, быстро затвердевает в водоохлаждаемом кристаллизаторе 2 и образует непрерывную заготовку 3; ее вытягивают с определенной скоростью тянущими роликами 4 и разрезают дисковой пилой 5 на куски мерной длины.

Литье выжиманием (рис. 24.7, а) применяют для получения тонкостенных крупногабаритных отливок типа панелей размерами до 1000–2500 мм с толщиной стенки 2–5 мм из алюминиевых, магниевых сплавов. При повороте подвижной полуформы залитый жидкий металл заполняет полость формы, его излишек сливают в приемный ковш. Существуют установки с плоскопараллельным перемещением подвижной полуформы. Литье выжиманием осуществляют на автоматических установках. При «жидкой прокатке» (рис. 24.7, б) металл непрерывной струей заливают в приемник, со-

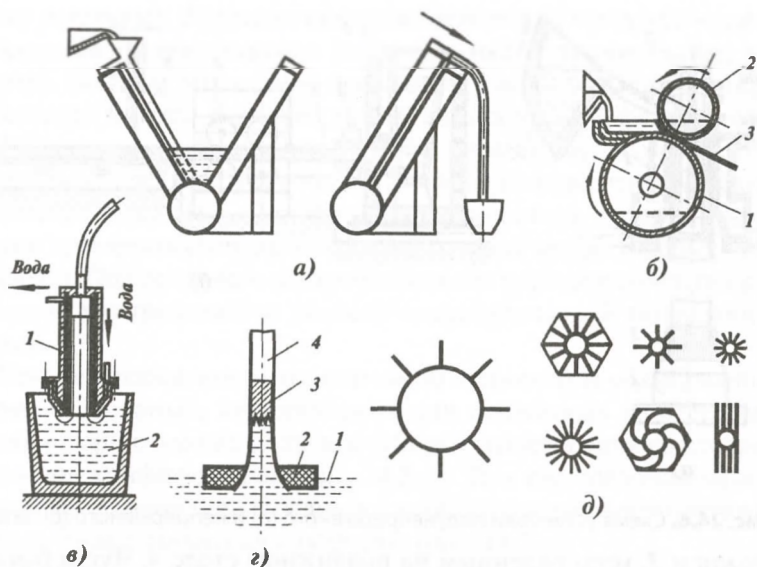


Рис. 24.7. Схемы литья:

а — выжиманием; *б* — «жидкой прокаткой»; *в* — вакуумным всасыванием; *г* — намораживанием; *д* — примеры сечений отливок, полученных намораживанием из расплава

стоящий из двух вращающихся валков *1, 2* с внутренним водяным охлаждением. На поверхности валков намораживается слой металла, образуя лист или ленту *3*. Таким способом на специальных установках с полной автоматизацией процесса отливают чугунные листы, ленты.

Литье вакуумным всасыванием (рис. 24.7, *в*) состоит в том, что металл заполняет литейную форму *1* благодаря разрежению, создаваемому в ней вакуум-насосом. После затвердевания носок формы-кристаллизатора извлекают из ванны с жидким металлом *2*. В результате пуска атмосферного воздуха в полость формы отливка удаляется.

Наиболее часто этот способ применяют для получения втулок, вкладышей, подшипников скольжения из дорогих и дефицитных бронз и латуней. Преимуществами такого способа литья являются уменьшение расхода металла на литники и прибыли, отсутствие окисления при литье, что важно, например, при производстве отливок из титановых сплавов. Способ применим для изготовления отливок простой формы.

Литье намораживанием (рис. 24.7, *г*) имеет несколько разновидностей. Общая характерная особенность состоит в том, что образо-

вание изделия происходит в результате последовательного затвердевания металла — его намораживания.

На поверхность жидкого металла 1 помещают плиту-поплавок с отверстием 2, соответствующим сечению отливки. В мениск жидкого металла, выступающего из отверстия, вводят затравку 4. При ее подъеме из отверстия плиты-поплавок за счет сил поверхностного натяжения постепенно вытягивается жидкий металл, затвердевающий (намораживающийся) и образующий изделие 3. Скорость вытягивания изделия должна быть точно согласована со скоростью охлаждения и затвердевания металла. Таким способом изготавливают ленты шириной 100 мм и более, трубы с внутренними и наружными ребрами и другие изделия из алюминиевых и некоторых других сплавов (рис. 24.7, д).

Электрошлаковое литье (ЭШЛ) — это способ получения фасонных отливок в водоохлаждаемой металлической литейной форме — кристаллизаторе, основанный на применении электрошлакового переплава (ЭШП) расходуемого электрода.

Сущность ЭШЛ заключается в том, что приготовление расплава (плавка) совмещено по месту и времени с заполнением литейной формы: отливка последовательно наплавляется в форму. Используются для получения отливок из специальных сталей и сплавов и отливок ответственного назначения, к которым предъявляются повышенные требования по качеству металла, механическим свойствам.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите этапы получения отливки по выплавляемым моделям.
2. Назовите составы основных модельных сплавов.
3. Как влияет нагрев формы на процесс получения отливки?
4. Какие существуют способы получения отливок в оболочковые формы?
5. В чем состоят особенности литья в металлические формы?
6. Назовите основные схемы литья под давлением и центробежного литья.
7. В каких случаях применяют специальные способы литья?

Раздел VIII

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Глава 25

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

25.1. СУЩНОСТЬ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Обработка металлов давлением основана на их способности в определенных условиях пластически деформироваться без разрушения в результате воздействия на деформируемое тело (заготовку) внешних сил.

Если при упругих деформациях деформируемое тело полностью восстанавливает исходные форму и размеры после снятия внешних сил, то при пластических деформациях изменение формы и размеров, вызванное действием внешних сил, сохраняется и после прекращения действия этих сил. Упругая деформация характеризуется смещением атомов относительно друг друга на величину меньше межатомных расстояний, а после снятия внешних сил атомы возвращаются в исходное положение. При пластических деформациях атомы смещаются относительно друг друга на величины больше межатомных расстояний, и после снятия внешних сил не возвращаются в свое исходное положение, а занимают новые положения равновесия.

Для начала перехода атомов в новые положения равновесия необходима определенная величина действующих напряжений, зависящая от межатомных сил и характера взаимного расположения атомов (типа кристаллической решетки, наличия и расположения примесей, формы и размеров зерен поликристалла и т.п.).

Различают деформацию упругую (обратимую) и пластическую (необратимую, остаточную). Пластическая деформация при обработке металлов давлением способствует образованию формы изделия, а упругая деформация затрудняет ее образование. Так, при снятии внешней нагрузки формы и размеры заготовки изменяются вследствие остаточной упругой деформации.

Скольжение одной части кристаллической решетки относительно другой происходит по плоскостям наиболее плотного размещения атомов (плоскостям скольжения). В реальных металлах кристаллическая решетка имеет линейные дефекты (дислокации), перемещение которых облегчает скольжение.

Величина пластической деформации не безгранична, при определенных ее значениях может начаться разрушение металла.

На величину пластической деформации, которой можно достичь без разрушения (предельная деформация), оказывают влияние многие факторы, основные из которых — механические свойства металла (сплава), температурно-скоростные условия деформирования и схема напряженного состояния. Последний фактор оказывает большое влияние на значение предельной деформации. Наибольшая предельная деформация достигается при отсутствии растягивающих напряжений. Схемы напряженного состояния в различных процессах и операциях обработки давлением различны, вследствие чего для каждой операции, для каждого металла и температурно-скоростных условий существуют свои определенные предельные деформации.

Существенные преимущества обработки металлов давлением — возможность значительного уменьшения отхода металла, а также повышения производительности труда, поскольку в результате однократного приложения усилия можно значительно изменить форму и размеры деформируемой заготовки. Кроме того, пластическая деформация сопровождается изменением физико-механических свойств металла заготовки, что можно использовать для получения деталей с наилучшими эксплуатационными свойствами (прочностью, жесткостью, высокой износостойкостью и т.д.) при наименьшей их массе.

Как уже было сказано, в основе обработки металлов давлением лежит процесс пластической деформации, при котором изменяется форма без изменения массы. Все расчеты размеров и формы тела при обработке давлением основаны на *законе постоянства объема*, суть которого заключается в том, что объем тела до и после пластической деформации принимается неизменным: $V_1 = V_2 = \text{const}$ (V_1 и V_2 — объем тела до и после деформации).

Изменение формы тела может происходить в направлении трех главных осей; при этом каждая точка стремится перемещаться в том направлении, в котором создается наименьшее сопротивление ее перемещению. Это положение в теории обработки металлов давлением носит название *закона наименьшего сопротивления*.

При свободном формоизменении тела в различных направлениях наибольшая деформация происходит в том направлении, в котором большинство перемещающихся точек встречает наименьшее сопротивление своему перемещению. Так, например, если при прокатке в двух валках с поперечными насечками течение металла вдоль оси прокатки сдерживается, а в поперечном направлении увеличивается, то при круговых насечках будет наблюдаться обратное явление.

Другим примером действия закона наименьшего сопротивления может служить превращение образца квадратного сечения (или любого другого) при его осаживании в круговое (рис. 25.1).

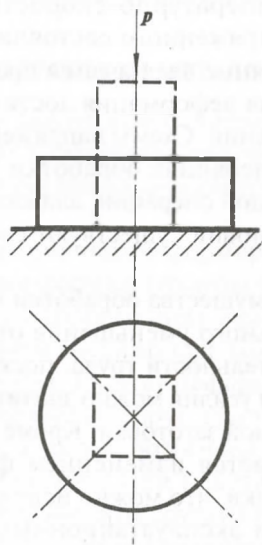


Рис. 25.1. Схема осадки образца квадратного сечения

Законы постоянства объема и наименьшего сопротивления распространяются на все способы обработки металлов давлением.

При этом закон постоянства объема используют для определения размеров заготовок, а закон наименьшего сопротивления позволяет определить, какие размеры и форму поперечного сечения получит заготовка с тем или иным сечением в процессе обработки давлением.

Влияние обработки давлением на структуру и свойства металла.

В зависимости от температурно-скоростных условий деформирования различают холодную и горячую деформацию.

Холодная деформация характеризуется изменением формы зерен, которые вытягиваются в направлении наиболее интенсивного те-

чения металла. При холодной деформации формоизменение сопровождается изменением механических и физико-химических свойств металла. Это явление называют упрочнением (наклепом): возрастают характеристики прочности, в то время как характеристики пластичности снижаются. Упрочнение возникает вследствие поворота плоскостей скольжения, увеличения искажений кристаллической решетки в процессе холодного деформирования (накопление дислокаций у границ зерен). Изменения, внесенные холодной деформацией в структуру и свойства металла, не обратимы. Они могут быть устранены, например, с помощью термической обработки — отжига. В этом случае происходит внутренняя перестройка, при которой за счет дополнительной тепловой энергии, увеличивающей подвижность атомов, в твердом металле без фазовых превращений из множества центров растут новые зерна, заменяющие собой вытянутые, деформированные. Так как в равномерном температурном поле скорость роста зерен по всем направлениям одинакова, то новые зерна, появившиеся взамен деформированных, имеют примерно одинаковые размеры по всем направлениям.

Явление зарождения и роста новых равноосных зерен взамен деформированных, вытянутых, происходящее при определенных температурах, называется рекристаллизацией. Для чистых металлов она начинается при абсолютной температуре, равной 0,4 абсолютной температуры плавления металла. Время, требуемое для рекристаллизации, тем меньше, чем выше температура нагрева деформированной заготовки.

При температурах ниже температуры начала рекристаллизации наблюдается явление, называемое возвратом. При возврате (отдыхе) форма и размеры деформированных, вытянутых зерен не изменяются, но частично снимаются остаточные напряжения. Снятие остаточных напряжений при возврате почти не изменяет механических свойств металла, но влияет на некоторые его физико-химические свойства. Так, например, в результате возврата значительно повышаются электрическая проводимость, сопротивление коррозии холоднодеформированного металла.

Формоизменение заготовки при температуре выше температуры рекристаллизации сопровождается одновременным протеканием упрочнения и рекристаллизации.

Горячей деформацией называют деформацию, характеризующуюся таким соотношением скоростей деформирования и рекристаллизации, при котором рекристаллизация успевает произойти во всем

объеме заготовки и микроструктура после обработки давлением оказывается равноосной, без следов упрочнения.

Чтобы обеспечить условия протекания горячей деформации, приходится с увеличением ее скорости повышать температуру нагрева заготовки (для увеличения скорости рекристаллизации).

Если металл по окончании деформации имеет структуру, не полностью рекристаллизованную, со следами упрочнения, то такая деформация называется неполной горячей деформацией. Неполная горячая деформация приводит к получению неоднородной структуры, снижению механических свойств и пластичности, поэтому обычно нежелательна.

При горячей деформации сопротивление деформированию примерно в 10 раз меньше, чем при холодной деформации, а отсутствие упрочнения приводит к тому, что сопротивление деформированию (предел текучести) незначительно изменяется в процессе обработки давлением. Этим обстоятельством объясняется в основном то, что горячую обработку применяют для изготовления крупных деталей, так как при этом требуются меньшие усилия деформирования (менее мощное оборудование).

Горячую деформацию целесообразно применять и при обработке труднодеформируемых, малопластичных металлов и сплавов, а также заготовок из литого металла (слитков). В то же время при горячей деформации окисление заготовки более интенсивно (на поверхности образуется слой окалины), что ухудшает качество поверхности и точность получаемых размеров.

Холодная деформация без нагрева заготовки позволяет получать большую точность размеров и лучшее качество поверхности по сравнению с обработкой давлением при достаточно высоких температурах. Температура нагрева для деформации зависит в первую очередь от природы деформируемого материала. Однако в любых случаях температура нагрева должна быть значительно ниже температуры солидуса сплава. Если материал перегрет, то может наступить пережог, выражающийся в интенсивном окислении границ зерен, и как следствие — охрупчивание материала. Пережог — дефект нагрева, который не может быть исправлен. Длительное пребывание металла при температуре, несколько меньшей, чем температура пережога, может привести к значительному росту зерна и снижению пластических свойств заготовки — явлению перегрева. В большинстве случаев перегрев может быть исправлен дополнительной температурной обработкой.

Температуру начала обработки давлением следует назначить на 50—100 °С ниже температуры солидуса сплава (рис. 25.2).

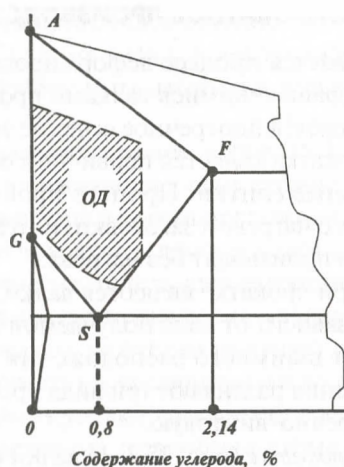


Рис. 25.2. Температурный интервал обработки давлением (ОД) низкоуглеродистых сталей

Заканчивать деформирование следует при температуре не ниже чем $T_{рек}$; деформирование при более низких температурах может привести к образованию трещин вследствие снижения пластичности.

В то же время окончание процесса деформации при температурах выше чем $T_{рек}$, также нежелательно, так как пребывание при высоких температурах может привести к чрезмерному росту зерна, а следовательно, к снижению механических характеристик металла.

Каждый металл и сплав имеет свой строго рекомендованный температурный интервал обработки давлением, определяемый по соответствующему справочнику.

Обработка давлением без специального нагрева заготовки позволяет сократить продолжительность технологического цикла, облегчает использование средств механизации и автоматизации и повышает производительность труда.

Влияние холодной деформации на свойства металла можно использовать для получения наилучших эксплуатационных свойств деталей, а управление изменением свойств в требуемом направлении и на желаемую величину может быть достигнуто выбором рационального сочетания холодной и горячей деформации, а также числа и режимов термических обработок в процессе изготовления детали.

25.2. ПРОКАТНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Прокаткой называется процесс деформирования металла путем его обжатия между вращающимися валками прокатного стана, в результате чего уменьшается поперечное сечение заготовки и увеличивается ее длина. Прокатка является первичной обработкой, которой подвергаются стальные слитки. Процесс прокатки осуществляют на прокатных станах с нагревом заготовки, и только операции получения тонкого листа производят без нагрева.

Инструментом при прокатке являются валки, форма рабочей поверхности которых зависит от вида получаемой продукции.

В зависимости от взаимного расположения заготовки и валков и характера их движения различают три вида прокатки: продольную, поперечную и поперечно-винтовую.

При *продольной прокатке* (рис. 25.3, а) валки имеют цилиндрическую форму; оси валков перпендикулярны оси заготовки. Валки вращаются в разные стороны. Благодаря трению между валками и заготовкой последняя втягивается в зазор между вращающимися валками и движется поступательно вдоль своей оси. В результате продольной прокатки заготовка получает обжатие по высоте, незначительное уширение и значительное увеличение длины. Форма и величина поперечного сечения изделия по всей длине постоянны. Продольной прокаткой обрабатываются слитки и заготовки разнообразных поперечных сечений.

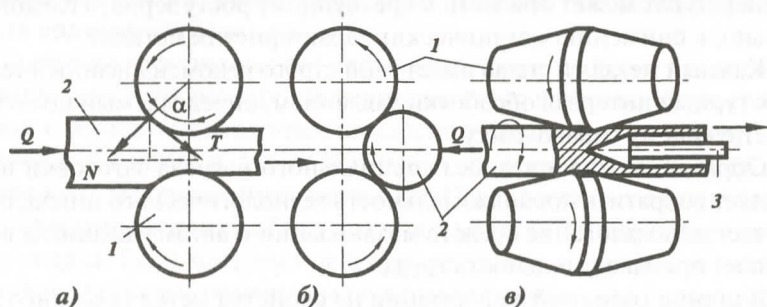


Рис. 25.3. Основные виды процессов прокатки:

1 — валки; 2 — заготовка; 3 — оправка

При *поперечной прокатке* (рис. 25.3, б) валки имеют тоже цилиндрическую форму, а их оси параллельны оси заготовки. Валки вращаются в одну сторону. В этом случае заготовка только вращается и поперечным усилием вталкивается в зазор между валками. В ре-

зультате уменьшается поперечное сечение заготовки на длине, приблизительно равной длине валка, и увеличивается ее длина. Этим способом можно обрабатывать заготовки только круглого поперечного сечения.

При *поперечно-винтовой прокатке* (рис. 25.3, в) валки имеют бочкообразную форму и вращаются в одну сторону, вследствие чего заготовка получает вращение в противоположную сторону. Оси валков расположены под углом друг к другу и к оси заготовки. Благодаря этому заготовка кроме вращательного движения получает одновременно и поступательное движение вдоль оси (то есть винтовое). В результате такой прокатки заготовка получает поперечное обжатие (уменьшается ее диаметр) и увеличивается ее длина. В этом случае заготовка должна иметь только круглое поперечное сечение.

На рис. 25.4 приведена подробная схема обжатия заготовки в гладких валках при продольной прокатке. Из схемы видно, что в результате продольной прокатки происходят уменьшение толщины заготовки — обжатие, увеличение ширины заготовки — уширение и увеличение длины заготовки — вытяжка. Абсолютным обжатием называют разность между исходной h_0 и конечной h_k толщиной полосы: $\Delta h = h_0 - h_k$; относительным обжатием — отношение абсолютного обжатия к исходной толщине полосы: $E = \Delta h / h_0$; абсолютным уширением называют разность между конечной шириной b_k и ис-

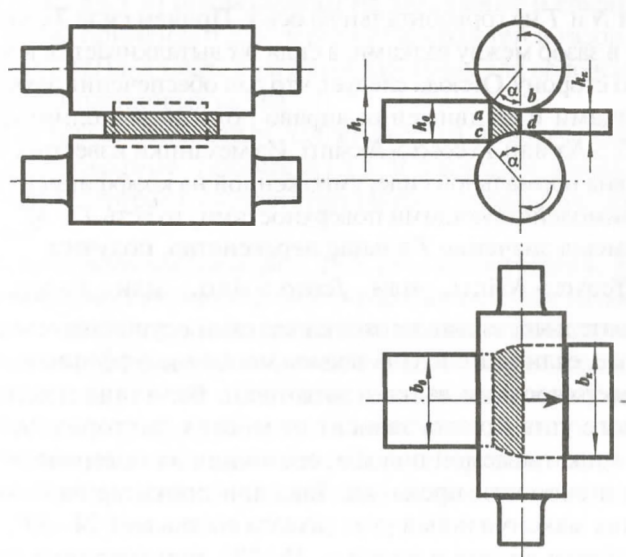


Рис. 25.4. Схема прокатки металла в гладких валках

ходной шириной b_0 : $\Delta b = b_k - b_0$; относительным уширением — отношение абсолютного уширения к исходной ширине заготовки: $y = \Delta b / b_0$.

Коэффициентом вытяжки при прокатке прямоугольной полосы называется отношение длины полосы после прокатки l_p к исходной длине полосы: l_p / l_0 .

Объем металла, находящийся в каждый данный момент прокатки между валками в зоне $abcd$, называется очагом деформации. В очаге деформации металл обжимается каждым из валков по дугам ab и cd . Эти дуги называются дугами захвата, а центральные углы, соответствующие этим дугам, — углами захвата. Угол захвата является одним из главных параметров процесса прокатки. Как видно из схемы (см. рис. 25.4), с увеличением угла захвата увеличивается абсолютное обжатие, а следовательно, и производительность труда. Так, углу γ_1 соответствует обжатие

$$\Delta h_1 = h_1 - h_k > \Delta h = h_0 - h_k.$$

Но угол захвата нельзя увеличивать безгранично, так как его величина лимитируется условием захвата заготовки валками. Условие захвата заготовки валками иллюстрируется схемой на рис. 25.3, а. В момент захвата со стороны каждого валка на металл действуют две силы: нормальная сила реакции N и касательная сила трения T . Перемещение заготовки вдоль оси осуществляется за счет неравенства проекций сил N и T на горизонтальную ось x . При этом сила Tx затягивает заготовку в зазор между валками, а сила Nx выталкивает ее в противоположную сторону. Отсюда следует, что для обеспечения захвата заготовки валками и ее движения вправо должно выполняться неравенство $Tx > Nx$ или $Tx \cos \alpha > Nx \sin \alpha$. Из механики известно, что сила трения равна нормальной силе, умноженной на коэффициент трения f между взаимодействующими поверхностями, то есть $T = Nf$.

Подставляя значение T в наше неравенство, получим

$$Nf \cos \alpha > N \sin \alpha, \text{ или } f \cos \alpha > \sin \alpha, \text{ или } f > \operatorname{tg} \alpha.$$

Следовательно, захват заготовки валками осуществляется только в том случае, если тангенс угла захвата меньше коэффициента трения между поверхностями валка и заготовки. Величина максимально допустимого угла захвата зависит от многих факторов: материала валков и прокатываемой полосы, состояния их поверхностей, температуры и скорости прокатки. Так, при прокатке на блюмингах и слябингах максимальный угол захвата составляет $24\text{--}30^\circ$, при горячей прокатке листов и полос — $15\text{--}20^\circ$, при холодной прокатке листов и лент со смазкой — $2\text{--}10^\circ$.

В результате прокатки получают изделия, имеющие самые разнообразные профили. Совокупность профилей и их размеров составляет сортамент прокатных изделий. Все профили в зависимости от их формы и назначения разделяют на четыре вида: сортовой прокат, листовой прокат, трубы, специальные виды проката.

Сортовой прокат (рис. 25.5, а) подразделяют на профили массового потребления и профили специального назначения. К первой группе относят простые профили — круг, квадрат, полоса, проволока — и фасонные — уголок, двутавр, швеллер и др. Ко второй группе относят рельсы, профили особой формы, применяемые в строительстве, машиностроении и других отраслях промышленности. Профили массового потребления применяют для получения заготовок под ковку, штамповку, обработку резанием и т.д. Профили специального назначения являются готовыми изделиями.

Листовой прокат (рис. 25.5, б) в зависимости от толщины листов подразделяют на две группы: толстолистовой (толщиной более 4 мм) и тонколистовой (толщиной менее 4 мм). Толстый лист используют в качестве исходного материала для штамповки с нагревом и без него. Тонкий лист широко применяют в машиностроении как исходный материал для холодной штамповки. Разновидностью листового проката является лента, которая все шире применяется в производстве.

Трубы (рис. 25.5, в) подразделяют на бесшовные и сварные. Бесшовные трубы применяют для передачи жидкостей и газов с давлением свыше 1 МПа, а также в качестве заготовок для волочения и получения подшипниковых колец.

Сварные трубы используют для жидкостей и газов низкого давления (водопроводные, газовые и т.д.). В последнее время потребность в сварных трубах и соответственно их производство постоянно возрастают.

Специальные виды проката (рис. 25.5, г) — это заготовки, имеющие в основном форму готовых изделий и обрабатываемые только по сопрягаемым поверхностям (шарики для подшипников, железнодорожные колеса, бандажи, конические зубчатые колеса и т.д.), а также прутки с периодически изменяющимся поперечным сечением (рис. 25.5, д), которые применяют в качестве исходного материала для получения заготовок при штамповке на кривошипных горячештамповочных прессах и горизонтально-ковочных машинах.

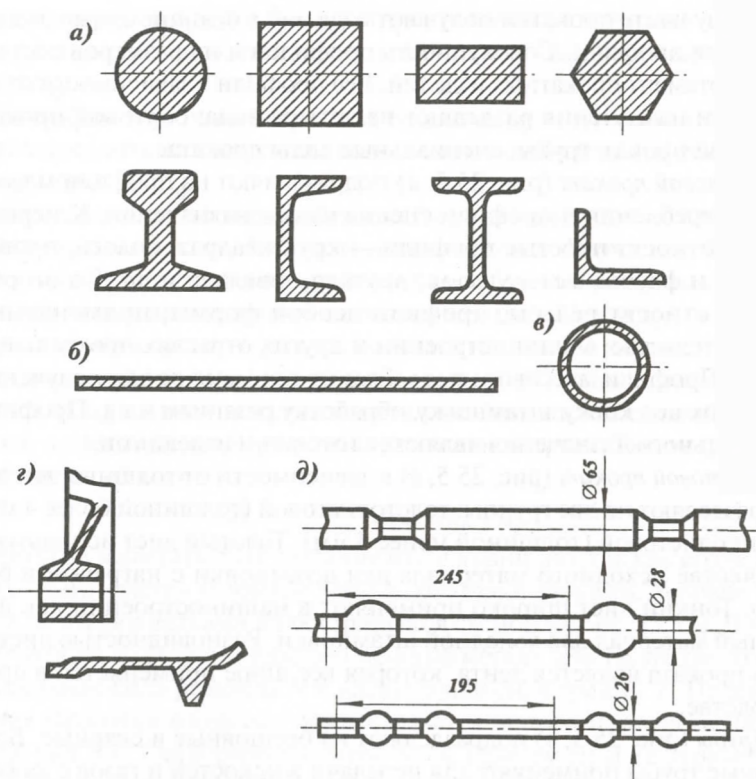


Рис. 25.5. Виды продукции прокатного производства:

а — профили сортового проката; *б* — профили листового проката; *в* — профиль трубы; *г* — специальные виды проката (железнодорожное колесо, профиль башмака трактора); *д* — примеры периодического проката

25.3. ВОЛОЧЕНИЕ

Волочением называется процесс деформирования металла путем его протягивания через отверстие в волоке, размеры которого меньше, чем исходные размеры заготовки. В результате поперечное сечение заготовки уменьшается и принимает форму сечения отверстия волоки, увеличивается длина заготовки, изделие получает точные размеры и чистую гладкую поверхность.

Изменение размеров сечения заготовки характеризуется обжатием — отношением разности площадей поперечного сечения исходной заготовки до волочения F_0 и после него F к площади сечения до волочения F_0 , %:

$$\lambda_b = [(F - F_0)/F_0] \cdot 100.$$

Во избежание разрыва прутка на выходе из волоки допускается обжатие за один проход не более 35%. Волочением можно обрабатывать углеродистые и легированные стали, цветные металлы и их сплавы.

В результате волочения можно получить сплошные профили простых и сложных сечений, трубы обычные и некруглого сечения.

Волочение — единственно возможный способ получения проволоки диаметром менее 5 мм. Получают этим способом и проволоку диаметром в несколько тысячных долей миллиметра. Инструментом для волочения служит волочильная матрица — волока, изготовленная из твердого сплава и остающаяся в процессе волочения неподвижной.

Профиль продукции обеспечивается формой волоки, изготавливаемой из инструментальных сталей У8, У12, Х12М, твердых сплавов ВК2, ВК3, а для получения тонкой проволоки (менее 0,3 мм) — из алмаза.

25.4. ПРЕССОВАНИЕ

Прессованием называется процесс горячего деформирования металла в замкнутом объеме контейнера путем выдавливания металла через отверстие в матрице, имеющее значительно меньшее поперечное сечение, чем заготовка.

Изделие, полученное прессованием, имеет поперечное сечение отверстия матрицы и длину, во много раз превышающую длину заготовки (рис. 25.6). В данном случае степень обжатия определяется

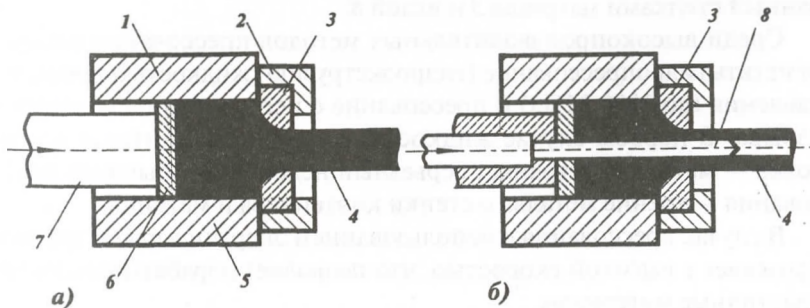


Рис. 25.6. Схемы процессов прямого прессования:

а — прутков; б — труб

как отношение разности площадей поперечных сечений полости контейнера F_k и отверстия в матрице F_m к площади F_k , %:

$$\lambda_{\Pi} = (F_k - F_m)/F_k \cdot 100.$$

Прессованные профили получают из сплавов на основе алюминия, меди, магния, титана и других металлов.

Изделия, полученные прессованием, могут иметь самые разнообразные поперечные сечения. Некоторые из них никаким другим способом получить не представляется возможным.

В процессе прессования применяют сложный инструмент (см. рис. 25.6, а). Основной частью инструмента является цилиндр 1, называемый контейнером, из которого в процессе прессования выдавливается заготовка 5. С одной стороны контейнер закрывается крышкой — матрицедержателем 2; в крышке закрепляется матрица 3, через которую выдавливается заготовка, и получается изделие 4 в виде прутка или трубы. С другой стороны в контейнер входит пресс-шайба 6, перемещаемая пуансоном 7. Пуансон через пресс-шайбу передает усилие пресса на металл.

Такая схема расположения частей инструмента характерна для прямого способа прессования, когда пуансон и выдавливаемый металл движутся в одном направлении. Существует способ обратного прессования, при котором пуансон и выдавливаемый металл движутся навстречу друг другу. Несмотря на некоторые преимущества (меньшее усилие, меньший отход металла), этот способ широкого применения не получил в силу ограниченной длины изделий, выходящих из контейнера в направлении расположения рабочих элементов пресса.

При прессовании труб и других полых изделий (см. рис. 25.6, б) металл выдавливается из контейнера в кольцевой зазор, образованный стенками матрицы 3 и иглой 8.

Среди высокопроизводительных методов прессования следует отметить гидропрессование (гидроэкструзию) жидкостью высокого давления (до 3000 МПа) и прессование с использованием энергии взрыва. В первом случае жидкостное трение на контакте «заготовка — матрица» устраняет серьезный недостаток обычного прессования — трение металла о стенки контейнера и матрицы.

В случае прессования с использованием энергии взрыва процесс протекает с высокой скоростью, что позволяет обрабатывать малопластичные материалы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы физико-механические основы обработки давлением?
2. Как изменяются свойства металлов при горячей и холодной обработке давлением?
3. Как определить оптимальный температурный интервал обработки металлов давлением?
4. Назовите разновидности процессов прокатки.
5. Какой тип заготовок можно получить волочением и прессованием?

Глава 26

ОБЪЕМНАЯ ШТАМПОВКА

Для массового производства поковок следует применять не ручную ковку, а штамповку, производительность которой в десятки раз выше, чем свободной ковки, а необходимая квалификация рабочих значительно ниже. Кроме того, при объемной штамповке достигаются значительно большие, чем при свободной ковке, точность размеров и чистота поверхности. Однако штамповка выгодна лишь в серийном производстве, потому что затраты на изготовление штампов оправдываются при выпуске значительного количества поковок.

При объемной штамповке формообразование поковок осуществляется в специальных инструментах — штампах, рабочие полости (ручьи) которых допускают течение деформируемого металла только в определенном направлении и до определенных пределов, в результате чего обеспечивается принудительное получение заданной формы и размеров поковки.

Горячую объемную штамповку широко используют в массовом и крупносерийном производствах, а в мелкосерийном производстве применяют значительно реже.

Горячей объемной штамповкой изготавливают поковки различной формы и размеров из сталей, цветных металлов и сплавов.

Штамповка может быть осуществлена в открытых и закрытых штампах. Открытыми называют штампы, у которых вдоль всего внешнего контура штамповочного ручья сделана специальная облойная канавка. Так как облойную канавку делают очень узкой, то течение в облой металла затруднено и возможно только при значительном давлении металла, находящегося в полости штампа.

При штамповке в открытых штампах поковка получается с облоем за счет некоторого избытка металла в исходной заготовке, вытесненного на заключительной фазе процесса штамповки в облойную канавку, состоящую из узкого зазора — мостика — и расширенной части — магазина (рис. 26.1, *а*). По мере затекания металла в облойную канавку давление нарастает и заставляет металл плотно заполнять все, даже очень небольшие и неудобные для заполнения, элементы формы ручья штампа, обеспечивая хорошее формообразование поковки. Для создания облоя массу заготовки при штамповке в открытых штампах несколько увеличивают, отход металла в облой составляет в среднем 10–20% от массы поковки.

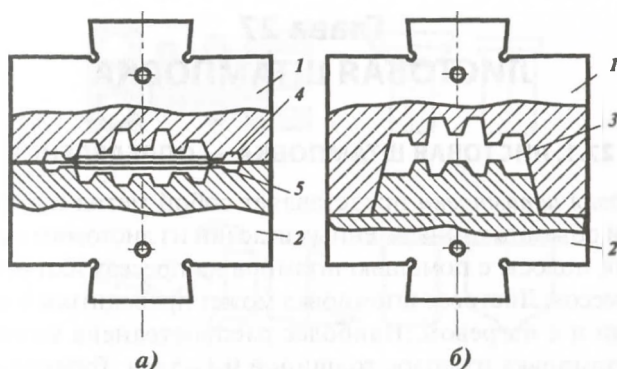


Рис. 26.1. Штамповка в открытом (а) и закрытом (б) штампах:

1 — верхняя половина штампа; 2 — нижняя половина штампа; 3 — конфигурация поковки; 4 — магазин; 5 — мостик

Штамповка в закрытых штампах является безоблойной (рис. 26.1, б).

Возможна холодная объемная штамповка — экономичный высокопроизводительный процесс изготовления небольших точных деталей из стали и цветных металлов. Холодной объемной штамповкой получают детали по 4–3-му классам точности с высокой чистотой поверхности, при этом металл упрочняется и его механические и физические свойства изменяются.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В каких случаях для получения заготовок применимаковка?
2. Перечислите особенности объемной штамповки в открытых и закрытых штампах.
3. Назовите основные операции холодной объемной штамповки.

Глава 27

ЛИСТОВАЯ ШТАМПОВКА

27.1. ЛИСТОВАЯ ШТАМПОВКА — ОПРЕДЕЛЕНИЕ

Листовая штамповка представляет собой метод изготовления плоских и объемных тонкостенных изделий из листового материала, ленты или полосы с помощью штампов на прессах или без применения прессов. Листовая штамповка может проводиться в холодном состоянии и с нагревом. Наиболее распространена холодная листовая штамповка из полос толщиной 0,1–5 мм. Горячая листовая штамповка производится, как правило, из полос толщиной >5 мм.

Основные преимущества листовой штамповки: возможность изготовления прочных, жестких, тонкостенных деталей простой и сложной формы, высокая производительность, экономный расход металла и простота процесса, относительная простота механизации и автоматизации процесса обработки.

Листовая штамповка широко распространена, и применение ее непрерывно расширяется.

27.2. РАЗНОВИДНОСТИ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ

Все операции листовой штамповки можно классифицировать на *разделительные* и *формоизменяющие*.

К основным разделительным операциям относятся: *резка* — последовательное отделение части металла по прямой или кривой линии; *вырубка* — единовременное отделение материала от заготовки по замкнутому контуру, причем отделяемая часть является изделием; *пробивка* — получение отверстий материала по замкнутому контуру внутри детали (рис. 27.1, а; 27.2).

К основным формоизменяющим операциям относятся правка, гибка, вытяжка, протяжка, отбортовка и формовка (рис. 27.1, б–г).

Правку применяют для устранения неровностей и искривлений плоских деталей после вырубки, пробивки, а также для исправления отдельных элементов формы деталей после гибки или других формоизменяющих операций. Так, плоские детали правят в штампах с гладкими плитами (рис. 27.3, а).

Гибка бывает одноугловая (V-образная) и двухугловая (U-образная) (рис. 27.3, б, в), а также многоугловая.

Вытяжка — операция, превращающая плоскую заготовку в полу деталь или полуфабрикат (рис. 27.3, г).

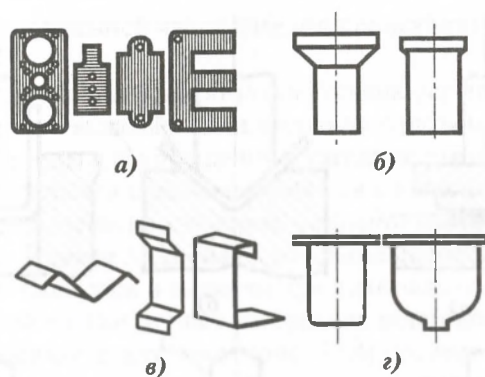


Рис. 27.1. Листовые штампованные детали, полученные вырубкой и пробивкой (а); отбортовкой (б); гибкой (в); вытяжкой и формовкой (г)

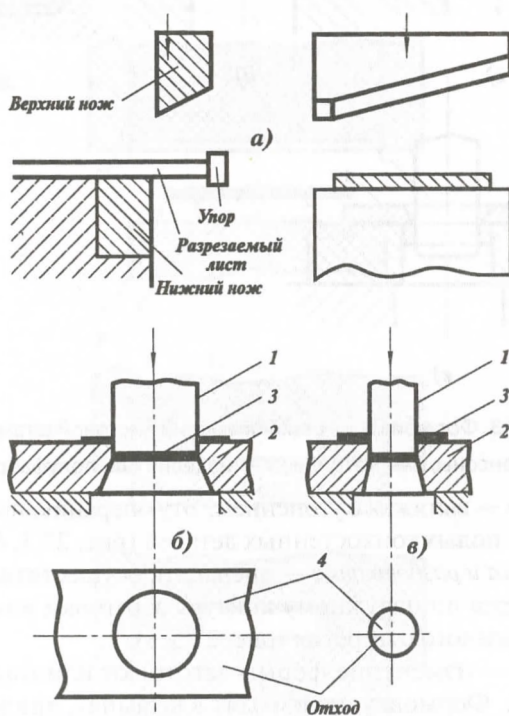


Рис. 27.2. Разделительные операции листовой штамповки:

1 — пуансон; 2 — матрица; 3 — изделия или полуфабрикаты; 4 — отходы

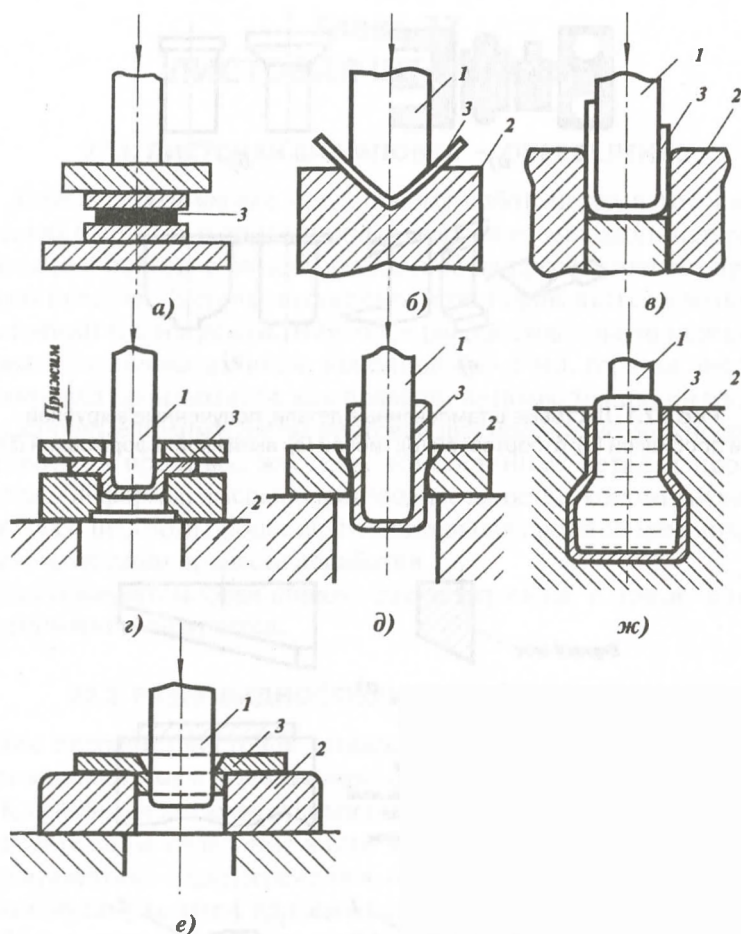


Рис. 27.3. Формоизменяющие операции листовой штамповки:

1 — пуансоны; 2 — матрицы; 3 — изделия или полуфабрикаты

Протяжка — вытяжка с утонением. Эту операцию применяют для изготовления полых тонкостенных деталей (рис. 27.3, б).

Отбортовка и разбортовка — операции, осуществляемые для образования борта по наружному контуру заготовки или по контуру ранее выполненного отверстия (рис. 27.3, г).

Формовка — изменение формы заготовки или полуфабриката (рис. 27.3, ж). Формовку производят в штампах, аналогичных вытяжным штампам, с силой прижима, увеличенной до такой степени, что зажатая часть листа не подвергается деформации. Изме-

нение формы внутренней части изделия происходит за счет ее утонения.

Раздачу средней части вытянутого стакана осуществляют с помощью резинового вкладыша или жидкости в разъемной матрице.

В последние годы для упрощения и удешевления оснастки разработаны и применяются способы обработки с использованием в качестве штампов эластичных материалов (например, резины).

Штамповку резиной применяют для выполнения вырубki, пробивки, гибки, отбортовки и вытяжки при изготовлении сравнительно крупных деталей из пластичных материалов толщиной до 2 мм. При вырубке и пробивке инструмент (рис. 27.4) состоит из шаблона 1, установленного на подштамповой плите, и контейнера, заполненного резиновой подушкой 3.

При надавливании резины на заготовку 2 последняя сначала обтягивает контуры шаблона, а затем разрывается по периметру кромки шаблона.

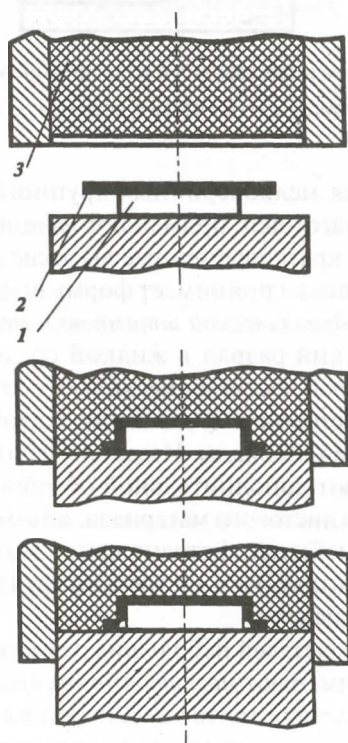


Рис. 27.4. Схема вырезки резиной

При вытяжке пуансон вдавливает заготовку в контейнер с резиной. Заготовка при этом плотно обтягивает пуансон и приобретает форму полый детали. При штамповке резиной используют гидравлические прессы.

Штамповку жидкостью высокого давления производят в замкнутом резервуаре. Жидкость под давлением порядка 20 МПа прижимает заготовку к полости матрицы и придает ей соответствующую форму.

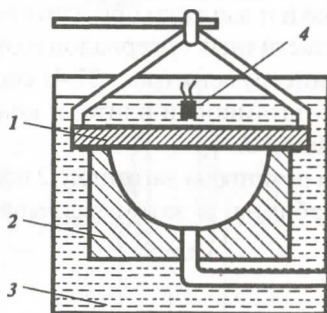


Рис. 27.5. Схема штампования в воде (штамповка взрывом):

1 — заготовка; 2 — матрица; 3 — емкость с водой; 4 — заряд взрывчатого вещества

Для изготовления мелкосерийных крупногабаритных деталей из толстолистовых заготовок применяют *штамповку взрывом*. При взрыве развиваются кратковременные высокие давления, под действием которых заготовка принимает форму штампа.

Метод электрогидравлической штамповки металла. Кратковременный электрический разряд в жидкой среде создает ударную волну, давление которой достигает нескольких сотен тысяч килопаскалей. Благодаря всестороннему давлению хорошо деформируются даже малопластичные материалы. Изделия имеют высокую точность размеров и не требуют дополнительной обработки. Этим методом производят детали из листового материала, объемные мелкие детали для самолетов, автомобилей, фотоаппаратов и др. Установки электрогидравлической штамповки не требуют фундамента, малогабаритны, легко перемещаются.

Для тонкостенных деталей небольших размеров (мембран, сильфонов) с успехом применяют *магнитоимпульсную штамповку*, основанную на взаимодействии магнитных полей катушки (соленоида) и магнитного поля, индуцированного в заготовке, в результате чего

возникают значительные электромеханические силы, отталкивающие заготовку от соленоида в направлении к матрице.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие операции листовой штамповки относят к разделительным и формоизменяющим?
2. Назовите особенности штамповки эластичной средой.
3. Для изготовления каких деталей используют штамповку взрывом?

Раздел IX

СВАРОЧНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Глава 28

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Сваркой называется технологический процесс получения неразъемных соединений. Сварку применяют для соединения однородных и разнородных металлов и сплавов, металлов с некоторыми неметаллическими материалами (керамикой, графитом, карборундом, стеклом и др.), а также пластмасс.

Впервые сварка металлов плавлением была осуществлена в России в 1881 г., когда русский инженер Н.Н. Бенардос использовал электрическую дугу, открытую в 1802 г. В.В. Петровым, для сварки и резки металлов с применением неплавящегося угольного электрода. В 1888 г. другой русский инженер — Н.Г. Славянов разработал способ дуговой сварки плавящимся металлическим электродом и изобрел первый автомат для сварки под флюсом.

В 1887 г. Н.Н. Бенардос запатентовал устройство для точечной контактной сварки, в котором в качестве электродов были использованы угольные стержни.

В 1895 г. химик Ле Шателье получил ацетилено-кислородное пламя, а в 1902 г. инженеры Пикари и Фуше создали промышленные газовые горелки.

Сварка — экономичный, высокопроизводительный и в значительной степени механизированный технологический процесс; ее широко применяют практически во всех отраслях машиностроения и строительной промышленности. Сварку как один из основных технологических процессов используют в авиации, ракето- и судостроении (при изготовлении цельносварных корпусов судов), при строительстве домн, резервуаров для хранения жидкости и газов, нефти и газопроводов, в транспортном машиностроении (при изготовлении цистерн, цельнометаллических вагонов), в энергомашиностроении (при производстве котлов, паровых и гидравлических турбин и многих других машин и конструкций). Замена деталей машин на прокатно-сварные или комбинированные, включающие литые,

кованные и штампованные элементы, соединенные сваркой, является экономически целесообразной, особенно если конструкция имеет сложную геометрическую форму, а также при единичном и мелкосерийном производстве. Применение сварки в этих случаях приводит к экономии металла, сокращению трудоемкости, снижению себестоимости и улучшению условий труда.

28.1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОЛУЧЕНИЯ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

Физическая сущность процесса сварки заключается в образовании прочных связей между атомами или молекулами на поверхности соединяемых заготовок. Для получения сварного соединения требуется сблизить соединяемые поверхности на расстояния, в пределах которых начинают действовать межатомные силы сцепления, и создать необходимые для возникновения межатомных или межмолекулярных связей условия: определенные температуру, время контакта и качество поверхности.

Таким образом, сварочный процесс, как и пайка, направлен на получение монолитного соединения, которое возникает в случае установления связей между атомами свариваемых деталей на границе их раздела, аналогично связям, действующим в твердом теле.

Определения понятия сварки могут быть различными — в зависимости от основных признаков, которые в данном определении преобладают. Например, сварка определяется как процесс получения неразъемных соединений посредством установления межатомных связей между соединяемыми частями при их нагревании и (или) пластическом деформировании. В данном определении указывается и на физическую сущность процесса и на технологические принципы его реализации.

Наиболее общим определением процесса сварки является ссылка на ее термодинамическую сущность: сварка — это процесс получения монолитного соединения материалов за счет термодинамически необратимого превращения тепловой и механической энергии и вещества в стыке.

Процесс сварки включает в себя две стадии: образование физического контакта между соединяемыми деталями и возникновение электронного взаимодействия между их поверхностями. Далее происходит развитие диффузионных процессов.

В идеальном случае сварка должна происходить после того, как соединяемые поверхности сблизятся на межатомные расстояния.

На рис. 28.1 показано, каким образом изменяются межатомные силы взаимодействия (притяжения и отталкивания), а также потенциальная энергия по мере сближения атомов. Как видно, на первой стадии сближения силы притяжения $P_{\text{пр}}$ больше сил отталкивания $P_{\text{от}}$ (рис. 28.1, а). Затем начинается процесс взаимного перекрытия электронных оболочек атомов и наблюдается резкое возрастание сил отталкивания.

При $r = r_0$ силы притяжения и отталкивания сравниваются. В дальнейшем сближение атомов будет сопровождаться интенсивным возрастанием сил отталкивания.

В идеальном случае атомы после некоторых колебательных движений должны самопроизвольно установиться на расстоянии $r = r_0$, когда $P_{\text{пр}} - P_{\text{от}} = 0$. В этот момент величина потенциальной энергии системы W будет минимальна, что характерно для устойчивого равновесия (рис. 28.1, б). Стремление системы к минимуму свободной энергии соответствует второму закону термодинамики, а минимум потенциальной энергии $W_{\text{в}}$ — энергии Ван-дер-Ваальсовой связи. Если энергию поверхности монокристалла принять за $W_{\text{п}}$, то после соединения монокристаллов между ними устанавливается одна поверхность раздела с энергией $W_{\text{в}}$.

Эта энергия меньше суммарной энергии двух поверхностей, то есть $W_{\text{в}} \ll 2W_{\text{п}}$.

Рассмотренная схема образования монолитного соединения при сварке, не противоречащая второму закону термодинамики, возможна,

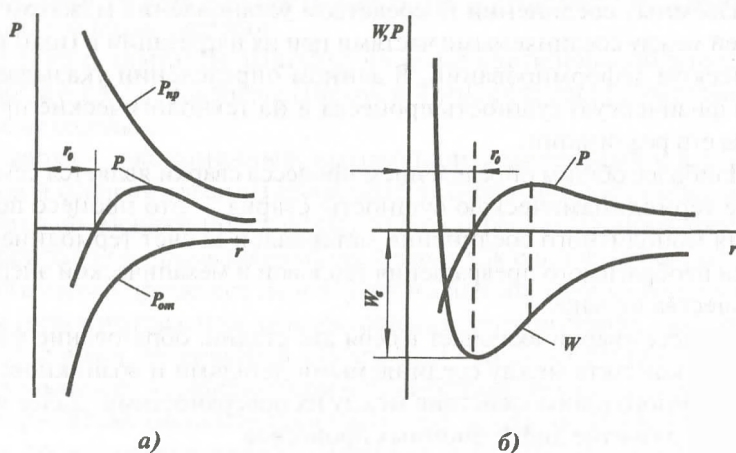


Рис. 28.1. Характер изменения сил взаимодействия (а) и потенциальной энергии (б) при сближении атомов

однако при наличии некоторой энергии активации, а не только в результате сближения соединяемых поверхностей. Поэтому в любом случае для сварки обязательно потребуется затратить энергию активации $W_{\text{п}}$, например, в виде теплоты (термическая активация) или упругопластической деформации (механическая активация). Образование монолитного соединения в реальных условиях затруднено из-за наличия на поверхностях деталей микронеровностей, оксидных пленок, адсорбированных газов, различного рода загрязнений.

При сварке пластмасс на их поверхности происходит объединение молекулярных цепей. В зависимости от характера вводимой энергии все сварочные процессы можно отнести к термическим (Т), термомеханическим (ТМ) и механическим (М) методам (табл. 28.1).

Таблица 28.1

Классификация видов сварки

Класс		
термический	термомеханический	механический
Дуговая Электрошлаковая Электронно-лучевая Плазменная Ионно-лучевая Тлеющим разрядом Световая Индукционная Газовая Термитная Литейная	Контактная Диффузионная Индукционно-прессовая Газопрессовая Дугопрессовая Шлакопрессовая Термокомпрессионная Печная	Холодная Взрывом Ультразвуковая Трением Магнитно-импульсная

При термических методах сварки с помощью внешнего источника нагрева кромки расплавляются, образуя так называемую сварочную ванну. Расплавление металла способствует его объединению в единое целое.

После прекращения поступления теплоты к сварочной ванне (удаление источника теплоты или его отключение) происходят быстрое охлаждение и последующая кристаллизация расплавленного металла при максимальном теплоотводе в стенки ванны. Процесс кристаллизации заканчивается образованием монолитного шва, который связывает свариваемые детали в единое целое. Аналогично при пайке вследствие кристаллизации припоя, заполняющего зазор между деталями и смачивающего нагретые поверхности, образуется паяное соединение.

При *термомеханических методах* сварки металл в месте соединения деталей нагревается от внешних источников теплоты до тем-

пературы плавления или пластического состояния. Нагревание позволяет снизить удельное давление, уменьшить величину минимальной относительной деформации, необходимой для сварки.

При *механических методах* сварки необходимо приложить давление, под влиянием которого в месте сварки возникают значительные упруго-пластические деформации, вызывающие разрушение оксидной пленки, смятие микронеровностей, обеспечение физического контакта и образование между атомами прочных связей, соответствующих связям при расстоянии между ними, равном параметру кристаллической решетки.

В соответствии с термодинамическим определением процессов сварки основными признаками для их классификации должны служить форма вводимой энергии, наличие давления и вид инструмента — носителя энергии, на основании чего классифицируют виды сварки.

Кроме того, сварку классифицируют и по другим признакам:

- по способу защиты металла в зоне сварки (сварка на воздухе, в вакууме, в защитном газе, под флюсом и т.п.);
- по непрерывности сварки (непрерывные и импульсные процессы);
- по степени механизации (ручная, механизированная, автоматическая);
- по технологическим отличиям (вид электрода или дуги, род сварочного тока, полярность, тип и количество электрических дуг и т.п.).

28.2. СВАРИВАЕМОСТЬ

Свариваемость — технологическое свойство материалов (металлов) или их сочетаний образовывать в процессе сварки соединения, отвечающие конструктивным и эксплуатационным требованиям к ним. Это определение следует отличать от свариваемости как простой возможности получать соединение. Свариваемость — сложное, комплексное свойство материала. Она в основном определяется типом и свойством структуры, возникающей в сварном соединении при сварке. При сварке однородных металлов и сплавов в месте соединения, как правило, образуется структура, идентичная или близкая структуре соединяемых заготовок. При сварке разнородных материалов в зависимости от различия их физико-химических свойств в месте соединения образуется твердый раствор с решеткой одного из материалов либо химическое или интерметал-

лидное соединение с решеткой, резко отличающейся от решеток исходных материалов. Механические и физические свойства твердых растворов (особенно химических или интерметаллидных соединений), например твердость, пластичность, электропроводность и другие свойства, могут значительно отличаться от свойств соединяемых материалов. Различие свойств может также вызываться образованием закалочных структур в зоне сварного соединения материалов вследствие локального высокотемпературного сварочного нагрева и быстрого охлаждения. Наличие хрупких и твердых структур в сварном соединении в условиях действия сварочных напряжений в ряде случаев приводит к возникновению трещин в шве или в околошовной зоне. В последнем случае материалы относят к категории удовлетворительно или плохо сваривающихся.

По мере совершенствования технологии сварки и разработки новых способов сварки с использованием интенсивных высокотемпературных источников теплоты, высоких давлений, глубокого вакуума, промежуточных сред и материалов и т.п. удастся получать работоспособные в отношении заданных свойств соединения плохо сваривающихся материалов. При этом возможна также сварка некоторых сочетаний материалов, ранее считавшихся практически несвариваемыми.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие основные причины препятствуют образованию монолитного сварного соединения и каковы способы их устранения?
2. По каким признакам и как классифицируют методы сварки?
3. В чем сущность технологического свойства свариваемости?

Глава 29

ТЕРМИЧЕСКИЕ ВИДЫ СВАРКИ

29.1. РУЧНАЯ ДУГОВАЯ СВАРКА

Источником теплоты при дуговой сварке является электрическая дуга, которая горит между двумя электродами, при этом часто один электрод представляет собой свариваемую заготовку. В зависимости от материала и числа электродов, а также способа включения электродов и заготовки в цепь электрического тока различают следующие схемы дуговой сварки: сварка неплавящимся (угольным или вольфрамовым) электродом *1* дугой прямого действия *2* (рис. 29.1, *а*), при которой соединение выполняется путем расплавления только основного металла *3*, либо с применением присадочного металла *4*; сварка плавящимся (металлическим) электродом *1* дугой прямого действия *2* (рис. 29.1, *б*) с одновременным расплавлением основного металла *3* и электрода, который пополняет сварочную ванну жидким металлом; сварка косвенной дугой *5* (рис. 29.1, *в*), горящей между двумя, как правило, неплавящимися электродами *1*, при этом ос-

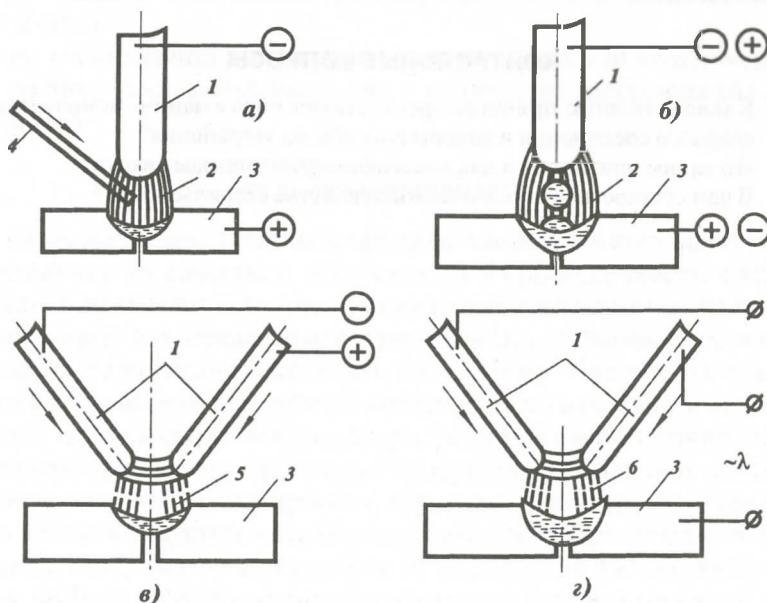


Рис. 29.1. Схемы электродуговой сварки

новой металл 3 нагревается и расплавляется теплотой столба дуги; сварка трехфазной дугой 6 (рис. 29.1, *г*), при которой дуга горит между электродами 1, а также между электродом и основным металлом 3. При применении постоянного тока различают сварку на прямой и обратной полярности. В первом случае электрод подключается к отрицательному полюсу и служит катодом, во втором — к положительному и служит анодом.

29.2. ПОНЯТИЕ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГЕ И ЕЕ СВОЙСТВАХ

Дуга — мощный стабильный разряд электричества в ионизированной атмосфере газов и паров металла. Ионизация дугового промежутка происходит во время зажигания дуги и непрерывно поддерживается в процессе ее горения.

Процесс зажигания дуги в большинстве случаев включает в себя три этапа: короткое замыкание электрода на заготовку, отвод электрода на расстояние 3–6 мм и возникновение устойчивого дугового разряда. Короткое замыкание (рис. 29.2, *а*) выполняют для разогрева торца электрода 1 и заготовки 2 в зоне контакта с электродом. После отвода электрода (рис. 29.2, *б*) с его разогретого торца (катода) под действием электрического поля начинается эмиссия электронов 3. Столкновение быстро движущихся по направлению к аноду электронов с молекулами газов и паров металла приводит к их ионизации 4 устойчивого дугового разряда (рис. 29.2, *в*).

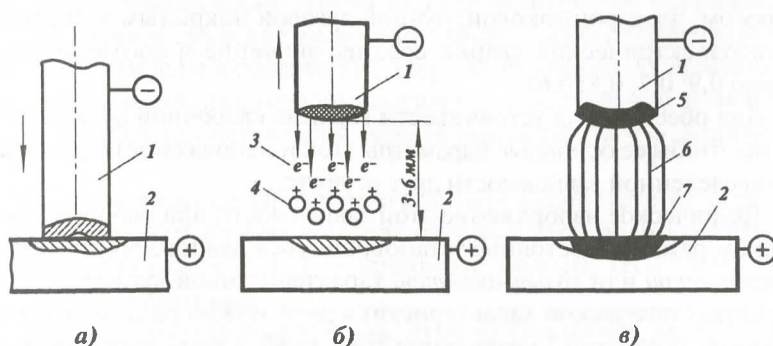


Рис. 29.2. Схема процесса зажигания дуги

В результате дуговой промежуток становится электропроводным. Процесс зажигания дуги заканчивается возникновением устойчивого дугового разряда (рис. 29.2, *в*). Возможно зажигание дуги без короткого замыкания и отвода электрода с помощью высокочастотного

электрического разряда через дуговой промежуток, обеспечивающего его первоначальную ионизацию. Для этого в сварочную цепь подключают источник высокочастотного переменного тока высокого напряжения (осциллятор). Этот способ применяют для зажигания дуги при сварке неплавящимся электродом.

Электрическая дуга — концентрированный источник теплоты с очень высокой температурой. Температура столба дуги 6 достигает 6000–7000 °С, а температура катодного 5 и анодного 7 пятен стальных электродов — 2400 и 2600 °С (рис. 29.2, в).

Полная тепловая мощность дуги, Дж/с:

$$Q = KI_{\text{св}} U_{\text{д}},$$

где K — коэффициент несинусоидальности напряжения и тока (для постоянного тока равен единице, для переменного тока — 0,7–0,97); $I_{\text{св}}$ — сварочный ток, А; $U_{\text{д}}$ — напряжение дуги, В.

Однако не вся мощность дуги полностью расходуется на нагрев и расплавление электрода и основного металла, часть ее теряется в результате теплоотдачи в окружающую среду.

Часть мощности дуги, расходуемая на нагрев заготовки, называется *эффективной тепловой мощностью сварочной дуги*, Дж/с:

$$q = \eta Q,$$

где η — КПД дуги, представляющий отношение эффективной мощности дуги к полной; величина η зависит от способа сварки, вида и состава сварочных материалов (для автоматической сварки под флюсом, электрошлаковой, ручной дуговой покрытым электродом и газозлектрической сварки среднее значение η соответственно равно 0,9; 0,7; 0,8; 0,6).

Для обеспечения устойчивости горения сварочной дуги необходимо, чтобы ее основные параметры (ток и напряжение) находились в определенной зависимости друг от друга.

Графическое изображение этой зависимости при работе в статическом режиме (состояние установившегося равновесия) называют *статической* или *вольт-амперной* характеристикой дуги (рис. 29.3). Кривую статической характеристики дуги можно разделить на три области. В области I увеличение тока до 80 А вызывает резкое падение напряжения на дуге. Дугу с падающей характеристикой практически не используют в сварочной технике вследствие ее малой устойчивости.

В области II статическая характеристика носит жесткий характер. Увеличение тока от 80 до 800 А не изменяет напряжение дуги. Оно практически остается постоянным. Это объясняется тем, что пло-

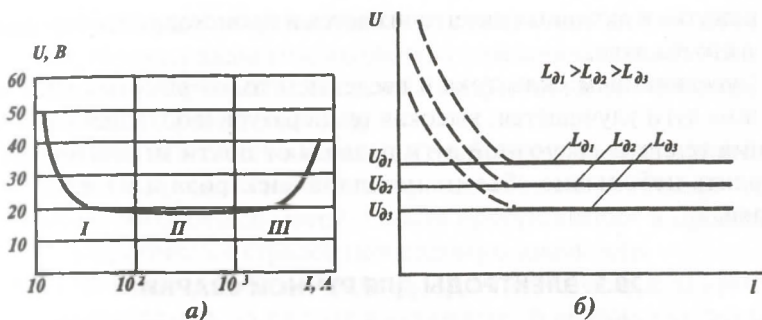


Рис. 29.3. Статическая (вольт-амперная) характеристика дуги (а) и зависимость напряжения дуги U_d от ее длины L_d (б)

щадь сечения столба дуги и активных пятен растет пропорционально току, поэтому плотность тока и напряжение во всех участках этой области сохраняются примерно постоянными. Дугу с жесткой статической характеристикой (область II) широко применяют в сварочной технике для ручного и автоматического процессов.

В области III увеличение тока приводит к повышению напряжения на дуге. Это объясняется тем, что без возрастания напряжения дальнейшее увеличение плотности тока в электроде выше достигнутого невозможно, так как площадь пятна на торце электрода становится равной площади этого торца. Таким образом, дальнейшее повышение тока, проходящего через электрод, в данных условиях возможно только при повышении напряжения на дуге. Этим и объясняется возрастающая форма статической характеристики дуги в области III. Дугу с возрастающей статической характеристикой широко используют в автоматических и полуавтоматических процессах при сварке под флюсом и в защитных газах.

Каждому участку характеристики дуги соответствует определенный характер переноса расплавленного электродного металла в сварочную ванну: I и II — крупнокапельный, III — мелкокапельный или струйный.

Чтобы сохранять напряжение дуги неизменным, необходимо длину дуги поддерживать постоянной (рис. 29.3, б).

Для питания сварочной дуги применяют постоянный или переменный ток. При питании дуги постоянным током она горит более устойчиво. На переменном токе промышленной частоты нарушается стабильность ионизации дугового промежутка. При перемене знака, то есть при нулевом значении тока, дуга гаснет, температура дугового

промежутка и активных пятен снижается и происходит деионизация газов столба дуги.

С увеличением силы тока и введением токов высокой частоты горение дуги улучшается, высокая температура и большая концентрация теплоты сварочной дуги позволяют почти мгновенно расплавлять небольшие объемы металлов электрода и изделия при сварке.

29.3. ЭЛЕКТРОДЫ ДЛЯ РУЧНОЙ СВАРКИ

Электроды для ручной сварки представляют собой проволоочные стержни с нанесенными на них покрытиями. Стержень электрода изготавливают из специальной сварочной проволоки повышенного качества. Сварочная проволока в зависимости от состава может быть углеродистой (Св-08, Св-ЮГС и др.) и легированной (Св-06Х19Н10М5Т, Св-07Х25Н13 и др.). В марках проволоки буквосочетание «Св» означает «сварочная», затем следует марка сталей.

Электроды классифицируют по следующим признакам: типу покрытия, химическому составу жидкого шлака, назначению.

В состав покрытия электродов входят стабилизирующие, газообразующие, шлакообразующие, раскисляющие, легирующие и связующие компоненты.

Стабилизирующие компоненты увеличивают степень ионизации дугового промежутка и повышают стабильность горения дуги. В качестве стабилизирующих веществ применяют соединения калия, натрия, кальция, бария. За счет газообразующих составляющих при нагреве создается зона защитных газов вокруг дуги. К газообразующим относятся органические вещества и карбонаты (крахмал, мрамор, магнезит). Шлакообразующие компоненты при расплавлении образуют жидкий шлак на поверхности сварочной ванны. Шлак служит для защиты расплавленного металла от воздействия воздуха, а также является средой, через которую осуществляется раскисление и легирование наплавленного металла. Для получения шлака в покрытия вводят марганцевую руду, полевого шпат, плавленый шпат, мрамор, рутил и др. Раскисляющие компоненты предназначены для восстановления окислов, находящихся в сварочной ванне. В качестве раскислителей в ряде случаев применяют ферросплавы: ферромарганец, ферросилиций и др. Из жидкого шлака раскислители переходят в расплавленный металл, восстанавливают окислы и в виде нерастворимых окислов самого раскислителя снова возвращаются в шлак.

Легирующие компоненты служат для получения наплавленного металла требуемых химического состава и механических свойств.

В качестве легирующих для сталей в покрытия вводят феррохром, ферромolibден, ферротитан и др.

В качестве связующего в основном применяют жидкое натриевое стекло. Жидкое стекло связывает порошкообразные составляющие покрытия в обмазочную массу, а после просушивания и прокалики придает покрытию электродов необходимую прочность.

По химическому составу жидких шлаков электродные покрытия можно подразделить на кислые и основные. В шлаках кислых покрытий преобладает окись кремния SiO_2 . Кислые шлаки обладают хорошими раскисляющими свойствами, но через них нельзя в широких пределах легировать наплавленный металл в связи с интенсивным выгоранием легирующих примесей. В состав кислых покрытий входят марганцевая руда, полевой шпат, рутил и т.п. Электроды с кислыми покрытиями применяют для сварки углеродистых и низколегированных сталей. В шлаках основных покрытий преобладает окись кальция (CaO). Основные шлаки обеспечивают достаточно хорошее раскисление и позволяют вводить в металл шва значительные количества легирующих элементов. В состав основных покрытий входят мрамор, плакиковый шпат (CaF_2) и ферросплавы. Электроды с основным покрытием используют для сварки легированных и высоколегированных сталей.

Электроды для сварки конструкционных сталей подразделяют на типы (Э34, Э42) и марки. Цифры в обозначении типа электрода обозначают прочность наплавленного металла.

29.4. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ СВАРКЕ

При изготовлении сварных конструкций широко применяют следующие типы сварных соединений: *стыковые, нахлесточные, тавровые, угловые* (рис. 29.4).

Стыковые соединения имеют преимущества перед другими типами по прочности и технико-экономическим показателям.

Шов, соединяющий элементы стыкового соединения, называют *стыковым*, а таврового и нахлесточного — *угловым* или *валиковым*. В зависимости от числа проходов (слоев), необходимых для получения расчетного сечения шва, различают однопроходный (однослойный) и многопроходный (многослойный) стыковой и угловой швы.

Шов, соединяющий заготовки по всей их ширине, называют *сплошным*; шов, где сваренные участки чередуются с несваренными, — *прерывистым*.

Перед сваркой элементы конструкций подвергают соответствующей подготовке. Виды подготовки зависят от материала конструкции, его толщины, способа сварки, а также от технологических особенностей свариваемого изделия. Основными видами подготовки кромок являются угол раскрытия, величина притупления и зазор. Угол раскрытия и зазор необходимы для обеспечения провара всего сечения, а притупление предотвращает сквозное проплавление (прожог).

Подготовка кромок осуществляется на металлорежущих станках или на газорежущих машинах (кислородных, плазменных). Угол раскрытия и зазор необходимы для обеспечения провара всего сечения, а притупление предотвращает сквозное проплавление (прожог). Подготовка кромок осуществляется на металлорежущих станках или на газорежущих машинах (кислородных, плазменных). Конструктивные элементы подготовки кромок изделия для ручной электродуговой сварки регламентированы ГОСТом. Наиболее распространенные виды подготовки кромок при ручной электродуговой сварке приведены на рис. 29.4.

Сварные соединения желательно иметь равнопрочными основному металлу при всех температурах эксплуатации и при всех видах нагрузок (статических, ударных и вибрационных). Конструкции, в которых сварные соединения равнопрочны основному металлу, являются наиболее рациональными. Однако на практике достичь этого весьма сложно и не всегда удастся в основном из-за того, что при сварке плавлением в результате специфических особенностей процесса (кратковременность, высокие температуры и быстрое охлаждение) кроме сварного шва образуются также зоны термического влияния. Их строение приведено на рис. 29.5 на примере малоуглеродистой стали. Сам шов — наплавленный металл 1 и зоны неполного расплавления — имеет дендритное строение, характерное для литого металла; в связи с высокой скоростью охлаждения в зернах участка 2 может произойти закалка, металл этого участка обладает повышенной хрупкостью и низкими механическими свойствами. Кроме того, в зону термического влияния входят участки с мелкозернистой нормализованной структурой 3; с неполной перекристаллизацией 4 (температура нагрева лежит между A_{c1} и A_{c3}); с рекристаллизованным зерном 5 и зона синеломкости, характеризующаяся повышенной хрупкостью.

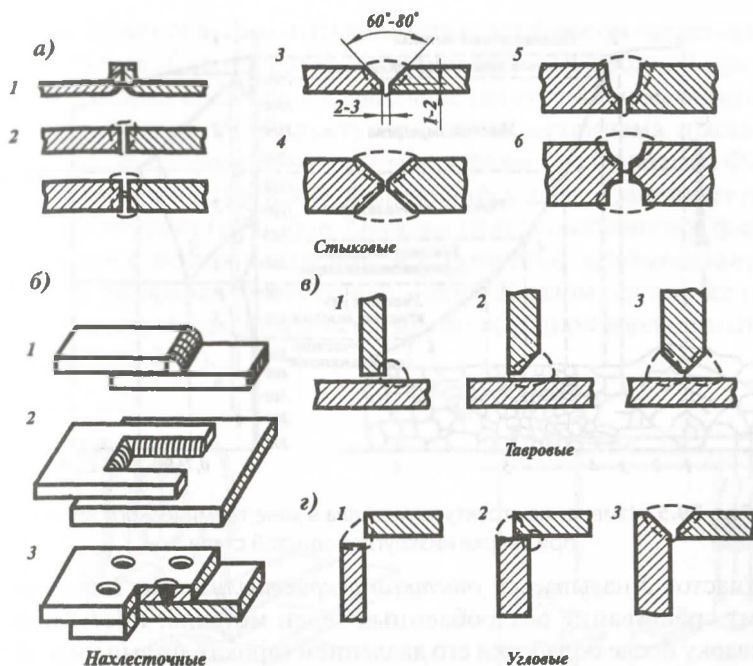


Рис. 29.4. Типы сварных соединений:

а — стыковые: 1 — отбортовочное; 2 — без разделки кромок; 3 — V-образная разделка кромок; 4 — X-образная разделка кромок; 5 — U-образная разделка кромок односторонняя; 6 — U-образная разделка кромок двусторонняя; *б* — нахлесточные: 1 — с односторонним лобовым швом; 2 — прорезное с односторонним лобовым и фланговыми швами; 3 — заклепочное; *в* — тавровые: 1 — с односторонним фланговым швом; 2 — то же, с односторонней разделкой кромок; 3 — с двусторонним фланговым швом и двусторонней разделкой кромок; *г* — угловые: 1 — с односторонним фланговым швом; 2 — то же, с двусторонними фланговыми швами; 3 — с V-образной разделкой кромок

Неравномерное распределение температур при сварке и другие сопутствующие физико-химические процессы, вызванные нагревом металла в месте соединения элементов конструкции, затрудняют получение свойств металла шва и зоны термического влияния (ЗТВ), близких к свойствам металла изделия. Шов представляет собой литой сплав, состоящий из основного металла (изделия) и присадочного (электрода), а ЗТВ — околошовный участок металла, нагретый в процессе сварки от 100 °С до температуры плавления.

Структура зоны термического влияния и ее ширина зависят от способа и режима сварки, химического состава и толщины свариваемого изделия.

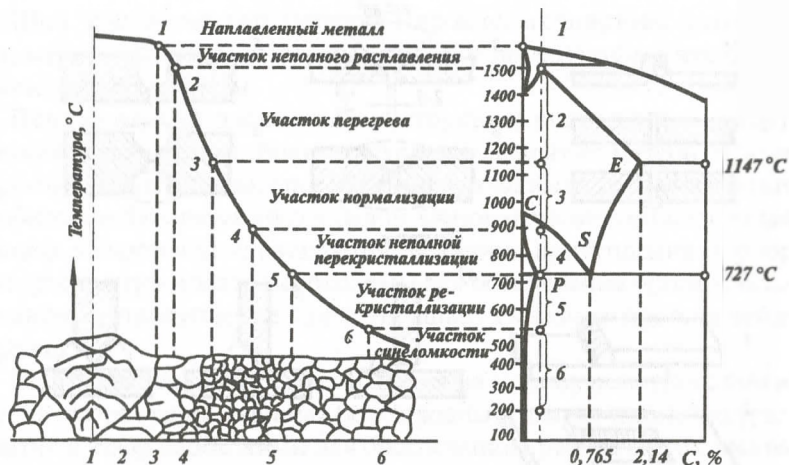


Рис. 29.5. Изменение структуры металла в зоне термического влияния при сварке низкоуглеродистой стали

Участок 5 называется *участком рекристаллизации*. Здесь происходит сращивание раздробленных зерен металла, поступившего на сварку после обработки его давлением (прокат, штамповка, ковка и др.). При сварке изделий из литья рекристаллизации не наблюдается. Для металлов и сплавов, склонных к старению, необходимо учитывать снижение пластичности на этом участке и снижение работоспособности конструкции.

За участком 5 располагается последний участок 6 с нагревом от 100 до 500 °С. Этот участок не претерпевает видимых структурных изменений и по своим свойствам практически не отличается от металла изделия. Называют его *участком синеломкости*.

29.5. АВТОМАТИЧЕСКАЯ СВАРКА ПОД ФЛЮСОМ

Автоматическая сварка под флюсом отличается от ручного процесса тем, что в этом случае подача и перемещение электродной проволоки механизированы, а защита плавильного пространства осуществляется жидким шлаком, полученным в результате расплавления флюса.

Автоматическая сварка под флюсом в 5–10 раз производительнее ручного процесса, а качество сварных швов превосходит швы, выполненные вручную. При автоматической сварке под флюсом коэффициент полезного использования теплоты дуги на плавление электродного и основного металла составляет 90–95%, а при ручной не превышает 80%.

Схема процесса автоматической сварки под флюсом представлена на рис. 29.6, а. Сварку изделия производят электродной проволокой 1, которая подается в плавильное пространство механизмом подачи (головкой 2). Структурная схема механизма показана на рис. 29.6, в. Впереди дуги насыпается флюс 4 из бункера 3. Флюс в процессе сварки плавится, и образующийся шлак 5 защищает плавильное пространство и шов. Остатки неиспользованного флюса собираются с поверхности шва и с помощью пневмошланга 6 (рис. 29.6) возвращаются в бункер. Таким образом, дуга и все плавильное пространство находятся в условиях полной изоляции от атмосферы (рис. 29.7).

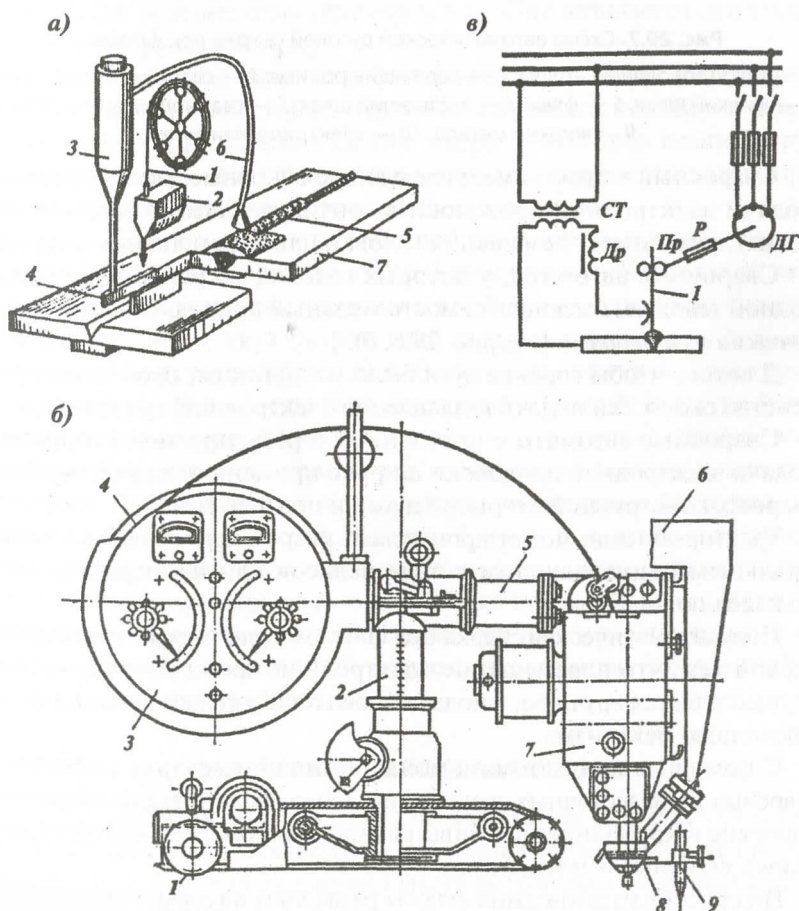


Рис. 29.6. Автоматическая сварка

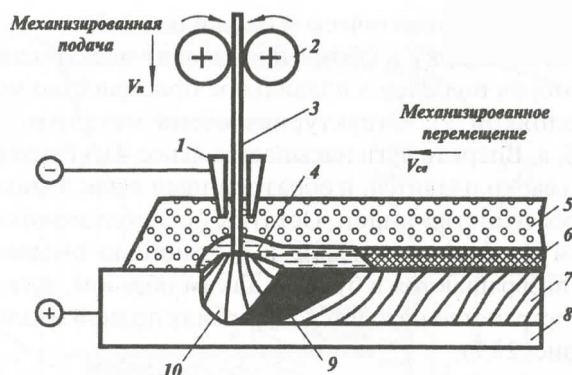


Рис. 29.7. Схема автоматической дуговой сварки под флюсом:

1 — токопроводящая втулка; 2 — подающие ролики; 3 — сварочная проволока; 4 — жидкий шлак; 5 — флюс; 6 — застывший шлак; 7 — сварной шов; 8 — деталь; 9 — жидкий металл; 10 — электрическая дуга

Сварочный автомат имеет следующие основные части: механизм подачи электродной проволоки в зону дуги (автоматическая головка), механизм перемещения головки или перемещения изделия.

Сварочные автоматы, у которых головка закреплена на самоходной тележке, имеющей самостоятельный привод, называют *сварочными тракторами* (см. рис. 29.6, б).

Для того чтобы горение дуги было устойчивым, необходимо равенство скоростей подачи и плавления электродной проволоки.

Сварочные автоматы с постоянной и регулируемой скоростью подачи электродной проволоки широко применяют в производстве сварных конструкций открытой дугой и под флюсом.

Трактор-автомат может производить сварку, перемещаясь по специальным направляющим в виде рельсов или непосредственно по изделию.

Полуавтоматическая сварка под флюсом отличается от автоматической тем, что перемещение электродной проволоки вдоль шва осуществляется вручную, а подача проволоки и флюса производится с помощью механизма.

С помощью полуавтомата можно выполнять сварку стыковых, тавровых и нахлесточных соединений. Он позволяет также сваривать короткие и криволинейные швы разного калибра, недоступные для сварки обычными автоматами.

По способу изготовления флюсы разделяют на плавленные и керамические, а по характеру образуемого шлака — на кислые и основные.

Флюс представляет собой зернообразный продукт с размером зерна 1–3 мм. Из флюса, расплавленного в зоне дуги, образуется шлак. Последний надежно защищает плавильное пространство от окружающей среды, раскисляет металл сварочной ванны, а в некоторых случаях и легирует металл шва (керамические флюсы).

Флюсы и электродная проволока при автоматической и полуавтоматической сварке должны обеспечивать устойчивое горение дуги, требуемый химический состав и механические свойства металла шва, отсутствие в нем пор и трещин и легкую отделяемость шлаковой корки от поверхности шва.

Глубина проплавления при автоматической сварке больше, чем при ручной, поэтому характер разделки кромок отличается от их подготовки под ручную сварку.

Автоматическая сварка требует более тщательной подготовки кромок и сборки под сварку: неровности кромок и колебания в размерах зазоров при сборке изделия под ручную сварку компенсируются ускорением или замедлением процесса сварки, тогда как при автоматической сварке этого сделать невозможно.

Сварку стыковых швов толщиной до 20 мм можно выполнять с односторонним скосом одной или двух кромок, Х-образной разделкой, с криволинейным скосом и т.п. В остальных случаях сварку стыковых швов с двух сторон производят на весу (рис. 29.8, а), на медной подкладке 7 (рис. 29.8, б) или стальной остающейся подкладке 1 (рис. 29.8, в), с ручной подваркой 4 (рис. 29.8, г) и на флюсовой подушке (рис. 29.8, д: 1 — флюс; 2 — шланг со сжатым воздухом). При сварке стыковых соединений без подкладок возможны прожоги. Валиковые швы, применяемые в тавровых и нахлестанных соединениях, выполняют «в лодочку» (рис. 29.8, е, ж: 1 — электрод). Для предохранения металла от вытекания при сварке угловых швов применяют те же меры, что и при сварке стыковых швов. Используют флюс и при сварке порошковой проволокой. В этом случае электрод представляет собой полую тонкостенную гибкую трубку, внутри заполненную флюсом.

29.6. ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ СВАРКА

Сущность способа электрошлаковой сварки заключается в том, что расплавление электродной проволоки и свариваемых кромок производится за счет тепла расплавленного флюса, который непрерывно нагревается при прохождении через него тока (рис. 29.9). Свариваемые детали устанавливают вертикально. К обеим сторонам

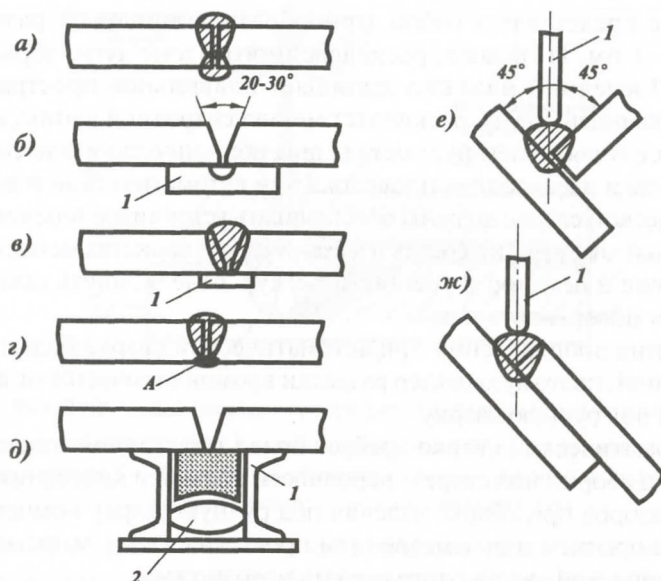


Рис. 29.8. Рекомендованные типы соединений и особенности их сборки

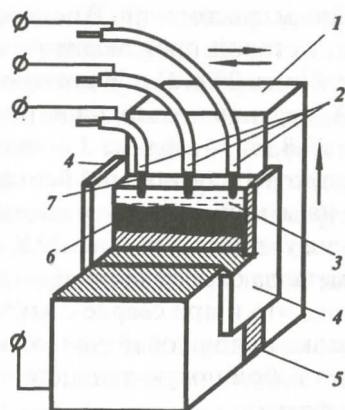


Рис. 29.9. Схема электрошлаковой сварки:

1 — свариваемые детали; 2 — мундштук; 3 — расплавленный флюс; 4 — медные ползуны; 5 — шов; 6 — расплавленный металл; 7 — электрод

свариваемого стыка плотно прижимают медные охлаждаемые водой ползуны, которые, в свою очередь, охлаждают расплавленный металл ванночки и препятствуют вытеканию жидкого металла и расплавленного флюса. Охлаждаемые ползуны в процессе сварки двигаются

вверх. Расплавленный металл электрода и свариваемых кромок стекает вниз, образуя сварочную металлическую ванночку.

По мере продвижения автомата вверх происходит затвердевание металла сварочной ванны и образуется шов. При этом способе расплавленный металл надежно защищается расплавленным шлаком от воздействия атмосферы.

Электрошлаковая сварка позволяет сваривать детали больших толщин. Практически верхний предел толщины не ограничен.

Электрошлаковая сварка нашла широкое применение в тяжелом машиностроении (при изготовлении станин прессов, валов, гидротурбин и т.д.), где она произвела техническую революцию в проектировании и изготовлении крупногабаритных конструкций.

29.7. ЭЛЕКТРОДУГОВАЯ СВАРКА В СРЕДЕ ЗАЩИТНЫХ ГАЗОВ

Дуговая сварка в среде защитного газа была изобретена Н.Н. Бенардосом. Этот процесс основан на оттеснении окружающего воздуха от зоны плавильного пространства. В результате достигается надежная защита металла электрода, сварочной проволоки и кристаллизующегося металла шва от воздействия внешней среды. Процесс сварки можно классифицировать по составу защитного газа, типу применяемого электрода (плавящийся или неплавящийся) и степени механизации.

Сварку в защитных газах применяют для сварки углеродистых, низколегированных конструкционных и высоколегированных сталей, сплавов алюминия, магния, никеля, меди, а также тугоплавких химически активных металлов (титан, цирконий, тантал, молибден).

При сварке неплавящимся электродом (вольфрамовым, угольным) применяют горелку, показанную на рис. 29.10. Горелка имеет зажимное цанговое устройство 3 для крепления электрода 1 и подвода тока к нему, сопло 2, формирующее поток защитного газа, подача которого регулируется вентилем 4.

Обычно при сварке плавящимся и неплавящимся электродами газовая защита, создаваемая соплом горелки, носит локальный (местный) характер. В случае когда возникает необходимость защиты всего шва изделия от контакта с внешней средой, сварку выполняют в контролируемой атмосфере, то есть в герметизированной камере, заполненной инертным газом.

В качестве защитных газов применяют инертные (аргон и гелий) и активные (CO_2 , реже N_2 , H_2) газы, а также смеси инертных и активных газов.

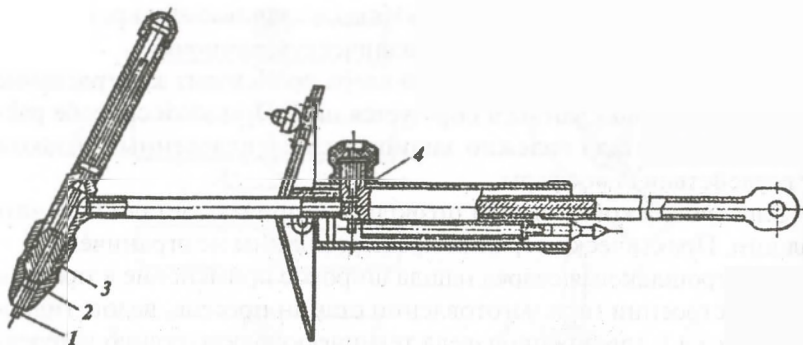


Рис. 29.10. Горелка для сварки в среде защитного газа неплавящимся электродом

Для сварки неплавящимся и плавящимся электродами в защитной среде применяют постоянный или переменный ток.

Сварка неплавящимся электродом в инертных газах может быть ручной, полуавтоматической и автоматической. При сварке применяют прутки из вольфрама диаметром от 0,5 до 4–5 мм. Род тока в технологии сварки неплавящимся электродом имеет очень большое значение. Сварка постоянным током прямой полярности отличается большей стабильностью процесса и лучшим формированием шва. При сварке сплавов на основе алюминия и магния неплавящимся электродом необходимо использовать переменный ток.

Сварку в инертных газах неплавящимся электродом можно производить с присадкой и без присадки за счет расплавления кромок металла свариваемого изделия.

Сварку плавящимся электродом в инертных газах выполняют на автоматах и полуавтоматах с постоянной скоростью подачи электродной проволоки. При этом способе сварки в большинстве случаев используют тонкую электродную проволоку диаметром 0,5–2,0 мм, имеющую химический состав, близкий к составу металла изделия. Для питания дуги обычно применяют источники постоянного тока с жесткой или возрастающей внешней характеристикой и обратную полярность, так как это повышает стабильность горения дуги и уменьшает разбрызгивание металла.

Сварка в среде углекислого газа аналогична сварке в среде инертных газов. Однако здесь в качестве защитного газа для сварки низкоуглеродистых, низколегированных и некоторых высоколегированных сталей используют дешевый и недефицитный оксид углерода. При сварке в среде оксида углерода происходит интенсивное

окисление металла, так как CO_2 по отношению к металлам при температуре 1000 °С становится сильным окислителем.

Реакции окисления могут протекать следующим образом:



где Me — окисляемый компонент, содержащийся в стали.

Окислительное действие углекислого газа, происходящее в плавленном пространстве, обычно нейтрализуется благодаря применению низкоуглеродистой сварочной проволоки (Св-08Г2С) с повышенным содержанием марганца и кремния.

Сварку в среде оксида углерода выполняют на автоматах и полуавтоматах с использованием плавящегося электрода.

Сварку плавящимся электродом, как правило, проводят на обратной полярности.

29.8. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА

Свободный электрон, обладающий элементарным зарядом и минимальной массой из всех известных частиц, под действием электрического поля может развивать огромную скорость (до 10^5 км/с) и за счет этого приобретать большой запас кинетической энергии. Это свойство электрона широко используется при электронно-лучевой сварке.

Скорость электрона v зарядом e и массой m определяется величиной ускоряющего напряжения U :

$$v = (2 \cdot eu/m)^{1/2}.$$

В современных устройствах для электронно-лучевой сварки используют напряжение от 25 до 250 кВ.

Энергия таких быстро движущихся электронов расходуется на плавление металла свариваемых деталей. При ударе электрона о поверхность и внедрении его в металл свариваемых деталей происходит резкое торможение, сопровождающееся превращением кинетической энергии в тепловую. Процесс выделения теплоты происходит на поверхности металла и на некоторой его глубине, где электроны испытывают наибольшее торможение. Вакуум порядка $133 \cdot 10^{-4}$ Па необходим для того, чтобы энергия электронов не расходовалась на ионизацию газов. Наличие вакуума создает весьма благоприятные условия для самоудаления с поверхности изделия адсорбированных газов и оксидных пленок, а благодаря увеличению скорости диффузии происходит усиление процесса дегазации всего объема расплавленного металла шва. Если учесть, что при совре-

менной технике вакуумирования легко достигается вакуум $133 \cdot 10^{-4}$ Па, то чистота вакуумной среды превосходит чистоту аргона в 1000 и более раз.

Схема установки для электронно-лучевой сварки представлена на рис. 29.11. Свариваемую деталь 7 через загрузочный люк помещают в специальную герметическую камеру 9, из которой при помощи непрерывно работающих форвакуумного и диффузионного насосов откачивается воздух и обеспечивается заданная степень разрежения.

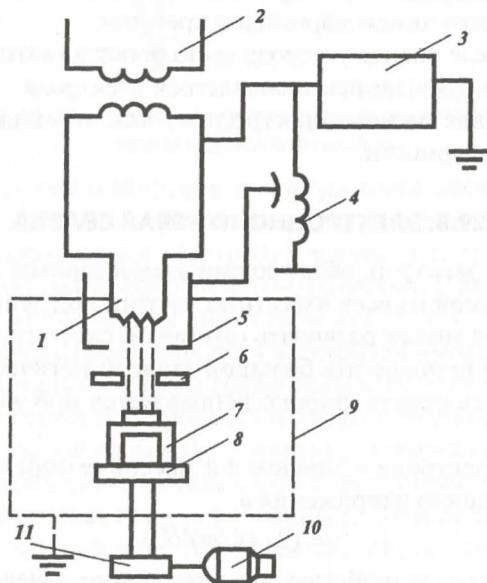


Рис. 29.11. Схема установки для сварки электронным лучом

Деталь 7, установленная на поворотном устройстве 8, передвигается (вращается) со скоростью сварки с помощью мотора 10 и редуктора 11.

При пропускании переменного тока от низковольтного трансформатора 2 неплавящийся вольфрамовый или металлокерамический катод 1 разогревается и эмитирует (излучает) электроны. Поток электронов проходит через специальную электростатическую линзу 5, отрицательное напряжение которой создается генератором 3, и фокусируется. Регулируется напряжение фокусировки с помощью потенциометра 4. Перемещение луча по свариваемому изделию производится перемещением поворотного устройства 8 или магнитной системой 6.

Устройство, служащее для получения и фокусировки электронов, называют *сварочной электронной пушкой*. Для усиления эмиссии и ускорения электронов от источника постоянного тока к катоду и аноду подводится высокое напряжение.

Концентрация энергии, достигаемая при фокусировке потока электронов, позволяет значительно увеличить удельную энергию и получать провар в виде узкого острого клина.

Наблюдение за процессом сварки электронным лучом ведут через смотровое окно вакуумной камеры. Необходима защита от воздействия рентгеновского излучения, интенсивность которого возрастает по мере увеличения ускоряющего напряжения. Электронно-лучевая сварка является одним из наиболее эффективных и прогрессивных процессов, позволяющих получать высококачественные соединения из тугоплавких и активных металлов.

Малая ширина зоны термического влияния вызывает незначительную деформацию конструкции.

29.9. ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА

В основу принципа действия квантового генератора и усилителя положено индуцированное (наведенное, направленное) излучение.

Для того чтобы получить индуцированное излучение, необходимо воздействовать на атомную систему таким источником энергии, который при введении определенной порции (кванта) энергии вызвал бы переход атома в возбужденное состояние. Тогда возврат атома в исходное состояние будет сопровождаться излучением фотона (кванта) той же энергии. Такое условие для преимущественной генерации вынужденного излучения и создается в оптических квантовых генераторах.

Основным энергетическим элементом оптического квантового генератора (ОКГ) является кристалл рубина (кристалл оксида алюминия, содержащий 0,05% Cr).

При концентрации нагрева металлов при сварке световой луч лазера превосходит все известные источники теплоты.

Лазерные установки на рубине имеют очень низкий КПД. Только 0,001 энергии газоразрядной лампы накачки превращается в энергию луча лазера, воздействующего на изделие в виде короткого, но очень мощного теплового импульса.

Существенно расширились возможности лазерной сварки после разработки газодинамических лазеров, позволяющих вести сварочный процесс деталей сравнительно больших толщин в непре-

рывном режиме. Преимущества сварки световым лучом по сравнению со сваркой электронным лучом следующие: простота фокусировки луча; возможность сварки на воздухе, в защитной атмосфере и в вакууме без существенных изменений исходного состояния свариваемого металла. Возможность точной дозировки энергии позволяет использовать этот метод в электронной и радиоэлектронной технике для сварки микросоединений из различных металлов и сплавов.

29.10. ГАЗОВАЯ СВАРКА МЕТАЛЛОВ

Газовая сварка представляет собой процесс, в котором расплавление металла изделия и присадочного металла осуществляется за счет теплоты, получаемой при сгорании горючего газа в кислороде. При этом способе сварки горючий газ является не только источником теплоты, но и средством защиты от проникновения азота и кислорода воздуха в сварочную ванну.

Для образования сварочного пламени при газовой сварке используют различные горючие газы (ацетилен, пропан, бутан, природный газ, водород) или пары горючих жидкостей: бензина, керосина и др. Однако из всего перечисленного наиболее широко применяют ацетилен (C_2H_2), так как он обеспечивает получение пламени с более высокой температурой (3200 °C).

Для работы одного-двух постов используют преимущественно баллонный ацетилен. Ацетиленовый баллон емкостью 40 л предварительно заполняется активированным углем и на $\frac{1}{3}$ объема заливается ацетоном. Ацетиленовый баллон всегда окрашивается в белый цвет. Хранение и эксплуатация таких баллонов безопасны.

Технический кислород, используемый при газовой сварке, получают из сжиженного воздуха. К месту потребления его доставляют в специальных металлических баллонах, окрашенных в синий цвет.

Один баллон емкостью 40 л, наполненный кислородом под давлением 15 МПа, содержит 6000 л кислорода в свободном состоянии.

Рабочая зона пламени состоит из продуктов неполного сгорания ацетилена (CO и H_2). В этой зоне выделяется большое количество теплоты, а образующаяся газовая среда имеет восстановительный характер и надежно защищает металл сварочной ванны от окисления и азотирования. Такое пламя горелки называют нормальным.

Нормальное пламя используют для сварки низкоуглеродистых, низколегированных и высоколегированных сталей, а также для сварки меди, никелевых сплавов, алюминия, цинка, свинца и др.

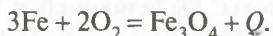
При сварке цветных металлов, окислы которых не восстанавливаются газами пламени, необходимо применять флюсы, содержащие химические растворители этих окислов.

29.11. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ТЕРМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В СВАРОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Резка металлов. В процессе резки металл из полости реза может быть удален термическим (расплавляется по линии реза и вытекает) и химическим (окисляется, превращается в окислы и шлаки, которые также удаляются из полости реза) способами. Оба эти процесса могут происходить одновременно. К термическому и химическому воздействию может присоединиться механическое действие струи газа, порошка, способствующее выталкиванию жидких и размягченных продуктов из полости реза.

Существует несколько способов резки, но в промышленности наиболее распространена газокислородная резка.

Газокислородная резка. Этот способ относится к термохимической резке и заключается в сжигании металла в струе технически чистого кислорода и удалении этой струей образующихся окислов. При горении железа в кислороде выделяется значительное количество теплоты по реакции



Для начала горения металл подогревают до температуры его воспламенения в кислороде (например, сталь — до 1000–1200 °С).

На рис. 29.12 показан процесс газокислородной резки. Металл 3 нагревается в начальной точке реза до температуры воспламенения специальным ацетилено-кислородным пламенем 2, затем направляется струя режущего кислорода 1 и нагретый металл начинает гореть. Горение металла сопровождается выделением теплоты, которая вместе с подогревающим пламенем разогревает лежащие ниже слои. Образующиеся окислы 5 в расплавленном состоянии выдуваются струей режущего кислорода из зоны реза 4. Конфигурация перемещения струи соответствует заданной форме реза. Металл будет разрезаться по заданной линии.

Для обеспечения нормального процесса резки металл должен отвечать следующим требованиям:

- 1) температура его плавления должна быть выше температуры горения в кислороде;
- 2) температура плавления окислов металла должна быть ниже температуры его плавления;

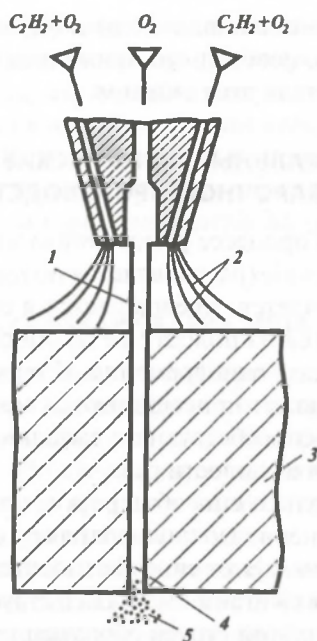


Рис. 29.12. Схема газокислородной резки

3) количество теплоты, выделяющейся при сгорании металла в кислородной струе, должно быть достаточным для поддержания непрерывного процесса резки;

4) теплопроводность не должна быть слишком высокой, в противном случае слишком интенсивно отводится теплота и процесс резки прерывается;

5) образующиеся окислы должны быть достаточно жидкотекучими и легко выдуваться вниз струей режущего кислорода.

Практически указанным требованиям отвечают железо, низкоуглеродистые и низколегированные стали.

Процесс газовой резки затрудняется при содержании в стали свыше 0,7% С, так как температура воспламенения в связи с этим повышается и достигает температуры плавления сплава. Содержание легирующих примесей не должно превышать 5%, так как они способствуют образованию тугоплавких окислов.

Чугуны, медные и алюминиевые сплавы, высокохромистые и хромоникелевые стали не поддаются нормальному процессу резки. Чугун имеет температуру горения, равную температуре плавления. Медь и ее сплавы не режутся вследствие высокой теплопроводности

и малой теплоты сгорания. Алюминий и его сплавы и высоколегированные стали покрыты тугоплавкой пленкой окислов, поэтому процесс резки затруднен.

Обычной кислородной резкой режут металлы толщиной 5–300 мм. При резке металла толщиной более 300 мм применяют специальные резаки.

Кислородно-флюсовая резка. При этом способе в зону резки вместе с режущим кислородом вдувают порошкообразный флюс с железной основой. При сгорании флюса в кислородной струе выделяется дополнительное количество теплоты. Окислы железа, образующиеся при сгорании железного порошка, сплавляясь с окислами разрезаемого металла, образуют более легкоплавкий и жидкотекучий шлак. В то же время частицы флюса, выходя из сопла резака с большой скоростью, механически удаляют тугоплавкие окислы.

Кислородно-флюсовой резкой режут металлы и сплавы, не поддающиеся обычной газовой резке, например высокохромистые и хромоникелевые стали, чугуны, медные сплавы. Кислородно-флюсовую резку выполняют с помощью специальной аппаратуры: флюсопитателя и кислородного резака с приспособлениями для подачи флюса.

Дуговая электрическая резка. Эта резка основана на выплавлении металла по линии реза теплотой электрического дугового разряда. Дуга возбуждается угольным или стальным электродом. Расплавленный металл стекает по стенкам образующегося углубления — реза — под действием собственной массы и незначительного давления дуги. Качество реза и производительность резки низкие. Этот способ является подсобным процессом при сварочно-монтажных работах.

Воздушно-дуговая резка. При этом способе металл расплавляется дугой с неплавящимся угольным или графитовым электродом, а расплавленный металл выдувается из полости реза потоком сжатого воздуха, подаваемого параллельно электроду.

Плазменно-дуговая резка. При резке проникающей дугой металл выплавляется из полости реза направленным потоком плазмы, совпадающим с токоведущим столбом создающей его дуги прямого действия. Этим способом режут толстые листы алюминия и его сплавов (до 80–120 мм), коррозионностойкую сталь и медные сплавы.

При плазменно-дуговой резке используют аргон и его смесь с водородом (до 35% H_2).

Наплавка — процесс нанесения слоя металла или сплава на поверхность, позволяющий придать металлу высокую износостойкость,

жаропрочность и жаростойкость, коррозионную стойкость и т.д. Наплавку используют как при изготовлении новых деталей, так и в ремонтных работах. Основные способы наплавки:

- 1) ручная дуговая электродами со стержнями и покрытиями специальных составов;
- 2) автоматическая наплавка под флюсом;
- 3) наплавка плавящимся и неплавящимся электродами в среде защищенных газов;
- 4) плазменная наплавка;
- 5) электрошлаковая наплавка;
- 6) электронно-лучевая, лазерная наплавка;
- 7) наплавка газокислородным пламенем.

Во всех случаях свойство наплавленного слоя определяется составом электродов или флюса. Наплавка тем эффективнее, чем меньше перемешивание материала электрода и основного металла.

Напыление. При напылении расплавленные по всему объему или по поверхностям частицы материала будущего покрытия направляют на поверхность нагретой заготовки. При соударении с поверхностью частицы деформируются, обеспечивая хороший физический контакт с деталью. Напыление позволяет в определенной степени получить требуемые свойства детали без дорогостоящего объемного легирования.

Наибольшее распространение получили процессы газоплазменного и плазменного напыления. Более высокие адгезионные свойства могут быть получены за счет диффузионных покрытий. В этом случае нагретая деталь в печи контактирует с материалом покрытия, находящимся в виде порошка или газовой фазы. За счет активных диффузионных процессов при высокой температуре и длительной выдержке получаемое на детали покрытие представляет с ним практически одно целое.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что представляет собой электрическая дуга как источник нагрева при сварке?
2. Каково назначение покрытия электродов для ручной дуговой сварки?
3. Какие источники питания используют для дуговой сварки и каковы требования к ним?
4. Каковы особенности автоматической сварки под флюсом и электрошлаковой сварки?
5. Каковы различия в защите расплавленного металла при аргонодуговой сварке и сварке в углекислом газе?

6. Каковы области применения электронно-лучевой и лазерной сварки?
7. Каково устройство инжекторной горелки для газовой сварки?
8. Назовите основные условия обеспечения процесса газокислородной резки металлов.
9. Каковы особенности кислородно-флюсовой резки?
10. Каково назначение наплавки и напыления в промышленности? Чем они отличаются друг от друга?

Глава 30

СВАРКА ДАВЛЕНИЕМ С НАГРЕВОМ (ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЙ КЛАСС)

30.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ КОНТАКТНАЯ СВАРКА. СУЩНОСТЬ ПРОЦЕССА

Контактная сварка относится к способам сварки давлением с кратковременным нагревом места соединения без оплавления или с оплавлением и с осадкой заготовок. Характерная особенность — быстрота пластической деформации, в ходе которой формируется сварное соединение.

Место соединения разогревается проходящим по металлу электрическим током, причем максимальное количество теплоты выделяется в месте сварочного контакта. Количество выделяемой теплоты определяется законом Джоуля—Ленца:

$$Q = 0,24 I^2 R t,$$

где Q — количество теплоты, выделяемое в сварочном контуре, Дж; R — полное сопротивление сварочного контура, Ом; I — сварочный ток, А; t — время протекания тока, с.

Полное сопротивление сварочного контура R состоит из сопротивления свариваемых заготовок $R_{\text{заг}}$, сопротивления сварочного контакта $R_{\text{к}}$ и сопротивления между электродами и заготовками $R_{\text{эл}}$, то есть

$$R = R_{\text{заг}} + R_{\text{к}} + R_{\text{эл}}.$$

Сопротивление сварочного контакта является наибольшим, так как поверхности стыка заготовок даже после тщательной обработки имеют неровности и соприкасаются только в отдельных точках. Благодаря этому происходит резкое уменьшение действительного сечения металла, через которое проходит ток, и в зоне контакта возникают большие плотности тока. Кроме того, на поверхности свариваемого металла имеются пленки окислов и загрязнения с малой электропроводностью, которые также увеличивают сопротивление.

В результате высокой плотности тока в точках контакта металл нагревается до термопластического состояния или до оплавления. При непрерывном сдавливании нагретых заготовок образуются новые точки соприкосновения, и так до тех пор, пока не произойдет полного сближения до межатомных расстояний, то есть сварки поверхностей.

Контактную сварку классифицируют по типу свариваемого соединения, определяющего вид сварочной машины, и по характеру тока, питающего сварочный трансформатор. По типу сварного соединения различают сварку стыковую, точечную, рельефную, шовную (роликовую).

30.2. СТЫКОВАЯ СВАРКА

Стыковая сварка является видом контактной сварки, при котором соединение происходит по всей поверхности соприкосновения. При стыковой сварке свариваемые соединения закрепляют в зажимах стыковой машины (рис. 30.1). Зажим 3 установлен на подвижной плите 4, перемещающейся в направляющих. Зажим 2 укреплен на неподвижной плите 1.

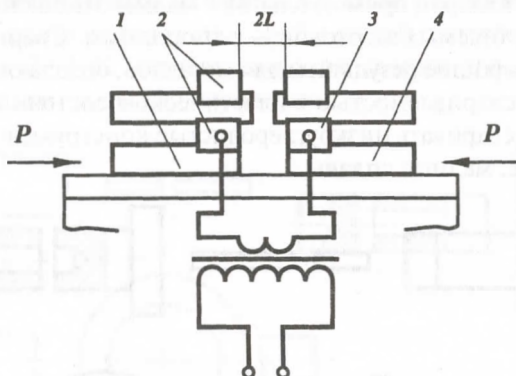


Рис. 30.1. Контактная стыковая сварка

Сварочный трансформатор соединен с плитами гибкими шинами и питается от сети переменного тока через включающее устройство. Плиты перемещаются, и свариваемые детали сжимаются под действием усилия P , развиваемого механизмом осадки.

Стыковую сварку с разогревом стыка до пластического состояния и последующей осадкой называют *сваркой сопротивлением*, а при разогреве торцов заготовок до оплавления — *сваркой оплавлением*.

При сварке сопротивлением заготовки должны быть очищены от окисных пленок и торцы их плотно пригнаны друг к другу. Для подгонки необходима механическая обработка торцов.

Заготовки, закрепленные в специальных зажимах, сдавливают небольшим усилием P , включают ток, и металл разогревается до пластического состояния; затем производят осадку. Место сварки имеет усиление металла.

Параметрами режима контактной стыковой сварки являются плотность тока j , А/м^2 , усилие сжатия торцов заготовок P , Н/м^2 и время протекания тока t , с, которое определяют косвенно через величину осадки, зависящую от установочной длины L . *Установочной длиной L* называют расстояние от торца заготовки до внутреннего края электрода стыковой машины, измеренное до начала сварки. Длина L зависит от теплофизических свойств металла, конфигурации стыка и размеров заготовки.

Типы сварных соединений, выполненных стыковой сваркой *сопротивлением*, представлены на рис. 30.2. Этим способом соединяют заготовки малого сечения (до 100 мм^2), так как при сварке больших сечений нагрев будет неравномерным. Сечения соединяемых заготовок должны быть одинаковыми по форме с малоразвитым периметром (круг, квадрат, прямоугольник с малым отношением сторон), а металл соединяемых заготовок — однородным. Сварка сопротивлением дает хорошие результаты для металлов, обладающих удовлетворительной свариваемостью в пластическом состоянии. Этим методом можно сваривать низкоуглеродистые конструкционные стали; алюминиевые, медные сплавы.

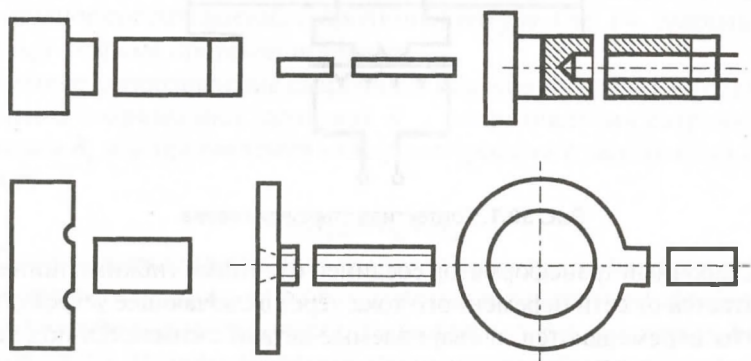


Рис. 30.2. Типы сварных соединений стыковой сварки сопротивлением

Стыковая сварка *оплавлением* имеет две разновидности: непрерывное и прерывистое оплавление. При непрерывном оплавлении между заготовками, установленными в зажимах машины, оставляют зазор, подключают напряжение и равномерно сближают заготовки под напряжением. Соприкосновение происходит в первую очередь по отдельным небольшим площадкам, через которые протекает ток высокой плотности. Расплавленный и кипящий металл выбрасывается наружу действием магнитного поля и паров металла. После до-

стижения равномерного оплавления всей поверхности стыка производят осадку.

При прерывистом оплавлении зажатые заготовки приводят в кратковременное соприкосновение и вновь разъединяют на небольшое расстояние. Быстро повторяя следующие одно за другим сближения и разъединения, оплавляют все сечение. Под давлением часть расплавленного металла вместе с окислами выдавливается из зоны сварки, образуя грат.

Сварка оплавлением имеет преимущества перед сваркой сопротивлением. В процессе оплавления выравниваются все выступы и неровности стыка, а окислы и загрязнения сгорают и удаляются, поэтому не требуется особой подготовки места соединения. Можно сваривать заготовки с сечением сложной формы, а также заготовки с различными сечениями, разнородные металлы. Примеры сварных соединений, выполненных стыковой сваркой оплавлением, приведены на рис. 30.3. К недостаткам этой сварки относится увеличенный расход металла на оплавление.

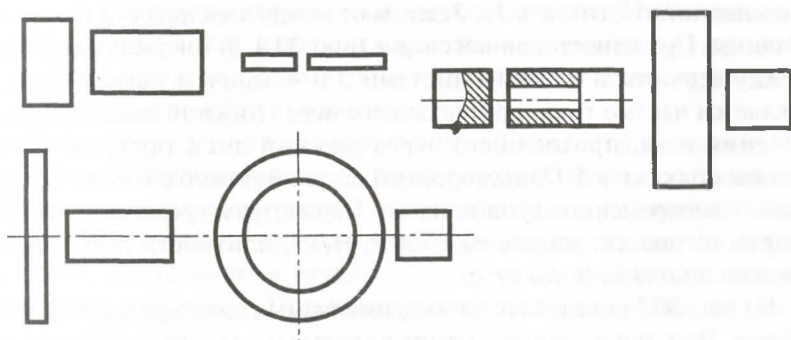


Рис. 30.3. Примеры сварных соединений стыковой сварки оплавлением

30.3. ТОЧЕЧНАЯ СВАРКА

Точечная сварка — вид контактной сварки, при которой заготовки соединяются в отдельных точках, причем одновременно можно сваривать одну, две или несколько точек. При точечной сварке заготовки собирают внахлестку и сдавливают с некоторым усилием P между двумя медными электродами, подводящими ток к месту сварки (рис. 30.4).

Нагрев продолжают до расплавления внутренних слоев, затем выключают ток и снимают давление. В результате образуется литая сварная точка.

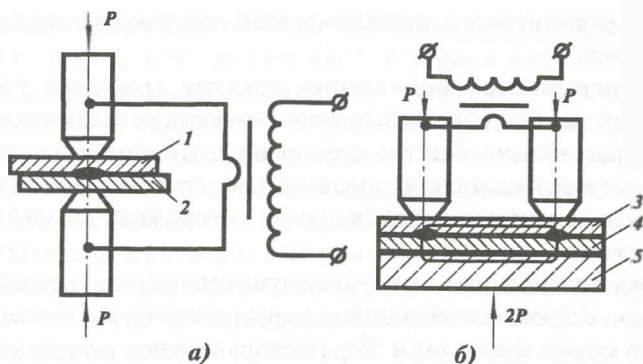


Рис. 30.4. Принципиальная схема контактной сварки:

а — двусторонняя; *б* — односторонняя

Точечная сварка в зависимости от расположения электродов по отношению к свариваемым заготовкам может быть двусторонней и односторонней. При двусторонней сварке (рис. 30.4, *а*) две или большее число заготовок 1 и 2 сжимают между электродами точечной машины. При односторонней сварке (рис. 30.4, *б*) ток распределяется между верхним и нижним листами 3 и 4, причем нагрев осуществляется частью тока, протекающего через нижний лист. Для увеличения тока, проходящего через нижний лист, предусмотрена медная подкладка 5. Односторонней сваркой можно соединять заготовки одновременно двумя точками. Параметрами режима точечной сварки являются: усилие сжатия P , Н/м², плотность тока j , А/м² и время протекания тока t , с.

На рис. 30.5 показана одна из применяемых циклограмм точечной сварки. Весь цикл сварки состоит из четырех стадий: 1) сжатие свариваемых заготовок между электродами; 2) включение тока и разогрев места контакта до температуры плавления, сопровождающиеся образованием литого ядра точки; 3) выключение тока и увеличение

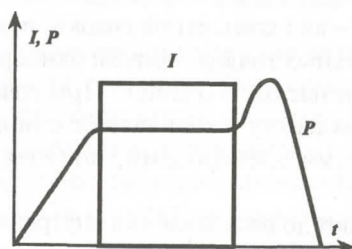


Рис. 30.5. Цикл контактной точечной сварки

усилия сжатия (ковочное давление) для улучшения структуры сварной точки; 4) снятие усилия с электродов. Перед сваркой место соединения очищают от оксидных пленок.

Примеры сварных соединений, выполненных точечной сваркой, показаны на рис. 30.6.

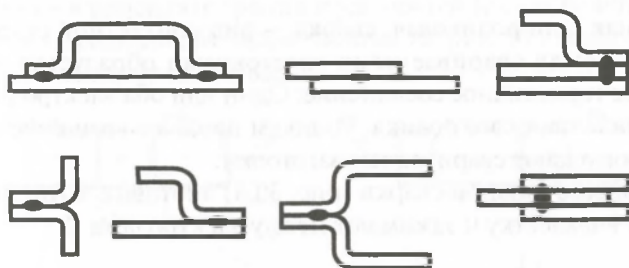


Рис. 30.6. Примеры сварных соединений для точечной сварки

Многоточечная контактная сварка — вид контактной сварки, когда за один цикл сваривается несколько точек. Многоточечную сварку применяют в основном в массовом производстве, где требуется большое число сварных точек на каждой свариваемой заготовке, например в автомобиле- и вагоностроении.

Рельефная сварка — способ точечной контактной сварки, при котором расположение точек определяется заранее подготовленными выступами в заготовке 2 (рис. 30.7). При рельефной сварке заготовки 2 и 4 зажимают между плоскими электродами 5 и 1. Соединение происходит в точках 3, которые получают штамповкой в одной из заготовок. При включении тока верхний электрод сжи-

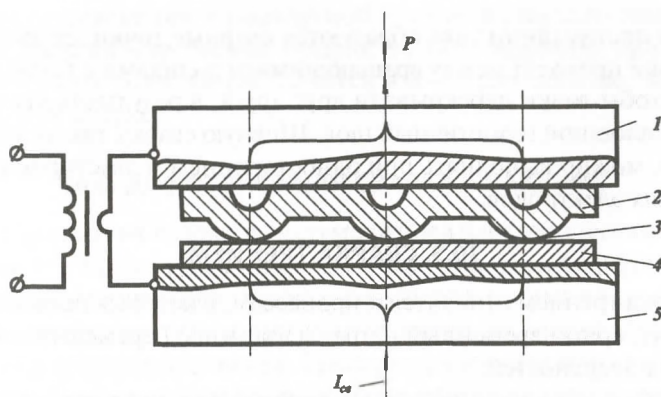


Рис. 30.7. Схема рельефной сварки

мает заготовки и спрессовывает и ликвидирует рельефы выступов. Таким образом, за один ход машины выполняют столько сварных точек, сколько выступов было отштамповано.

30.4. ШОВНАЯ, ИЛИ РОЛИКОВАЯ, СВАРКА

Шовная, или роликовая, сварка — вид контактной сварки, при которой между свариваемыми заготовками образуется прочное и плотное герметичное соединение. Один или оба электрода выполняют в виде плоского ролика. Роликам придают вращение и между ними пропускают свариваемые заготовки.

В процессе шовной сварки (рис. 30.8) листовые заготовки 1 соединяют внахлестку и зажимают между электродами 2.

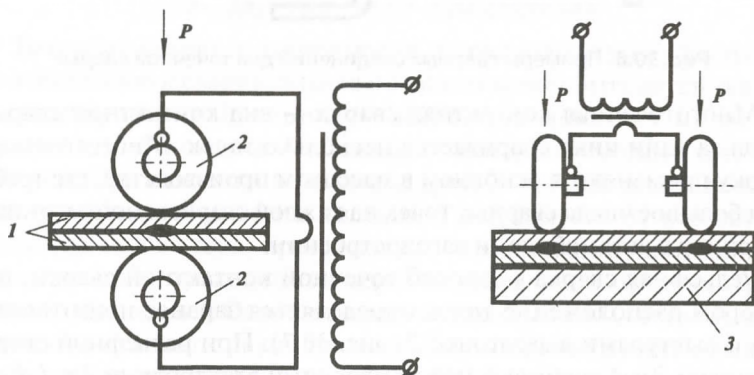


Рис. 30.8. Принципиальная схема шовной сварки:

1 — заготовки; 2 — электроды; 3 — медная подкладка

При пропускании тока образуются сварные точки, свариваемые заготовки проходят между вращающимися роликами с такой скоростью, чтобы точки перекрывали друг друга, в результате чего получается сплошной герметичный шов. Шовную сварку, так же как и точечную, можно выполнять при одностороннем и двустороннем положении электродов.

30.5. СВАРКА ТРЕНИЕМ

Сварка трением относится к процессам, в которых используются давление, кратковременный нагрев и взаимное перемещение свариваемых поверхностей.

Трение поверхностей осуществляется вращением или возвратно-поступательным перемещением свариваемых заготовок, сжимаемых

силой P . В результате нагрева и сжатия возникает совместная пластическая деформация. Сварное соединение образуется в результате возникновения металлических связей между чистыми контактирующими поверхностями свариваемых заготовок. Оксидные пленки, имеющиеся на металлических поверхностях в месте соединения, разрушаются в результате трения и удаляются за счет пластической деформации в радиальных направлениях. На рис. 30.9 даны принципиальные схемы сварки трением.

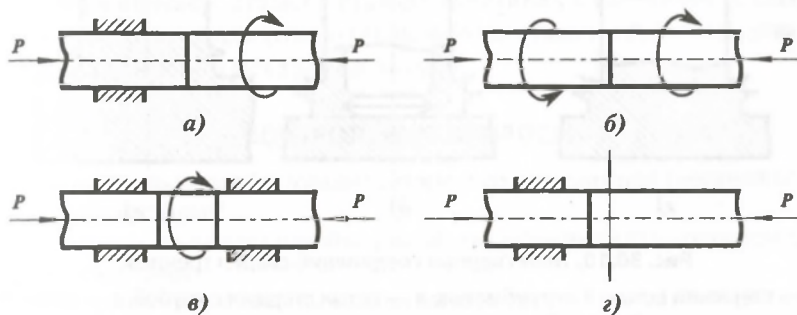


Рис. 30.9. Схемы сварки трением

Сваркой трением соединяют однородные и разнородные металлы и сплавы с различными свойствами, например медь со сталью, медь со сплавами ковар, медь с алюминием, алюминий с титаном и др. На рис. 30.10 приведены основные типы соединений, выполненных сваркой трением. В промышленности сварку трением применяют при изготовлении режущего инструмента, различных валов, штоков с поршнями, пуансонов и т.д. При сварке трением по сравнению с контактной стыковой сваркой снижаются затраты энергии и требуемые мощности. Так, например, при сварке стали трением энергии расходуется в 5–10 раз меньше, чем при контактной сварке.

30.6. ДИФфуЗИОННАЯ СВАРКА В ВАКУУМЕ

Диффузионная сварка в вакууме относится к процессам сварки давлением с длительным нагревом в вакууме. При диффузионной сварке соединение образуется в результате взаимной диффузии атомов в поверхностных слоях контактирующих материалов, находящихся в твердом состоянии. Температура нагрева при сварке разнородных материалов несколько выше или ниже температуры рекристаллизации наиболее легкоплавкого из них.

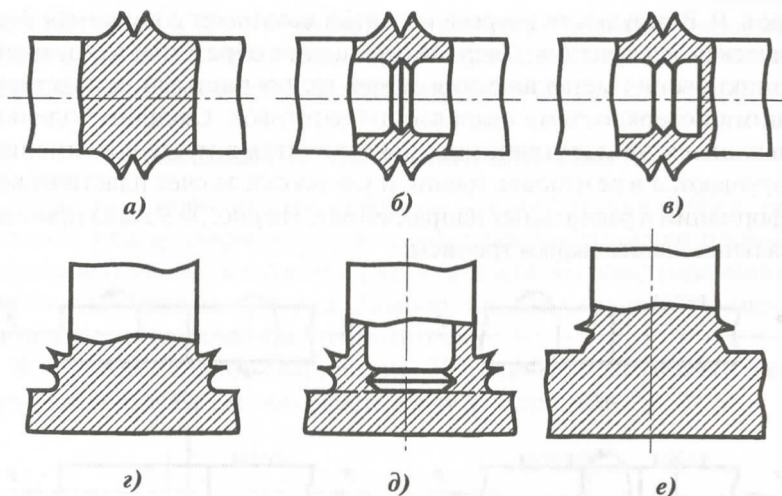


Рис. 30.10. Типы сварных соединений сварки трением:

а — стержней встык; *б* — труб встык; *в* — встык стержня с трубой; *г* — стержня с листом; *д* — трубы с листом; *е* — стержня с массивной деталью

Диффузионную сварку в большинстве случаев выполняют в вакууме, однако она возможна в атмосфере инертных газов. Свариваемые заготовки устанавливают внутри охлаждаемой металлической камеры, в которой создается вакуум порядка $133 \cdot 10^{-3} — 133 \times 10^{-5} \text{ Н/м}^2$, и нагревают с помощью вольфрамового или молибденового нагревателя или индуктора, по которому течет вода. Труба соединяет камеру с вакуумным насосом, а проводник соединяет индуктор с высокочастотным генератором. Может быть использован также и электронный луч, позволяющий нагревать заготовки с еще более высокими скоростями, чем скорости при использовании ТВЧ. Электронный луч целесообразно применять для нагрева при диффузионной сварке тугоплавких металлов и сплавов. После того как достигнута требуемая температура, к заготовкам прикладывают с помощью механического, гидравлического или пневматического устройства небольшое сжимающее усилие в течение нескольких минут.

Чтобы получить соединения хорошего качества, нагрев заготовок по всему сечению должен быть равномерным, а их поверхности — очищены от оксидов и загрязнений. Тончайшие адсорбированные и масляные пленки испаряются при нагреве в вакууме и не препятствуют образованию соединения.

Образование и развитие физического контакта происходит под влиянием ползучести и спекания металла. Преимуществом диффузионной сварки в вакууме является отсутствие припоев, электродов и флюсов. Металлы и сплавы можно соединять в однородных и разнородных сочетаниях, не принимая во внимание их твердость и взаимную смачиваемость, и получать прочные соединения без существенного изменения физико-механических свойств.

При диффузионной сварке в вакууме чистых и однородных материалов (например, стали со сталью, алюминия с алюминием, полупроводниковых элементов одинакового состава и т.п.) в образовавшемся соединении нет границ раздела.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каков механизм образования сварного соединения при точечной контактной сварке?
2. Какие существуют способы повышения производительности при точечной сварке?
3. Назовите основные отличия стыковой сварки сопротивлением от сварки оплавлением.
4. В чем преимущества шовной сварки с прерывистым включением тока по сравнению с его непрерывной подачей?
5. Как можно снизить потребляемую мощность при контактной сварке?
6. Что является параметрами режима при диффузной сварке?

Глава 31

СВАРКА ДАВЛЕНИЕМ БЕЗ НАГРЕВА

31.1. ХОЛОДНАЯ СВАРКА

Холодную сварку выполняют без нагрева при нормальных и даже при отрицательных температурах. Физическая сущность процесса заключается в сближении свариваемых поверхностей до образования металлических связей между ними и, следовательно, в получении прочных соединений. Такое сближение достигается приложением больших удельных давлений в месте соединения. В результате возникает совместная пластическая деформация. Большое усилие сжатия обеспечивает разрыв пленки окислов на свариваемых поверхностях и образование чистых поверхностей металла. Совместная пластическая деформация позволяет сблизить друг с другом кристаллы, расположенные перед сдавливанием в глубинных слоях металла. При холодной сварке свариваемые поверхности предварительно очищают от оксидов и жировых пленок. Ею сваривают точечные, шовные и стыковые соединения. На рис. 31.1, а представлен процесс холодной точечной сварки. Свариваемые заготовки 1 с тщательно зачищенной поверхностью 2 в месте соединения помещают между пуансонами 4, имеющими выступы 5. При сжатии пуансонов усилием P выступы 5 вдавливаются в металл по всей их высоте до тех пор, пока опорные поверхности 3 пуансонов не упрутся в наружную поверхность свариваемых заготовок. Форма сваренной точки зависит от формы выступа в пуансоне (рис. 31.1, з).

При стыковой холодной сварке соединяемые заготовки 7 закрепляют в соосно расположенных зажимах 6 (рис. 31.1, б). При осадке правый и левый зажимы сближают до соприкосновения, и острый край зажима отрубает излишний выдавленный металл — грат. В процессе осадки сближающие зажимы затрудняют течение металла и позволяют увеличить давление осадки. Деформируемый металл заполняет насечки 8, которые предотвращают его смещение в зажимах. Этим методом сваривают стержни и проволоку круглого, квадратного и прямоугольного сечений. Место сварки получается чистым и не требует последующей обработки.

Для холодной шовной сварки применяют специальные ролики. Непрерывное шовное соединение может быть получено за счет сдавливания одновременно по всей длине соединения или за счет про-

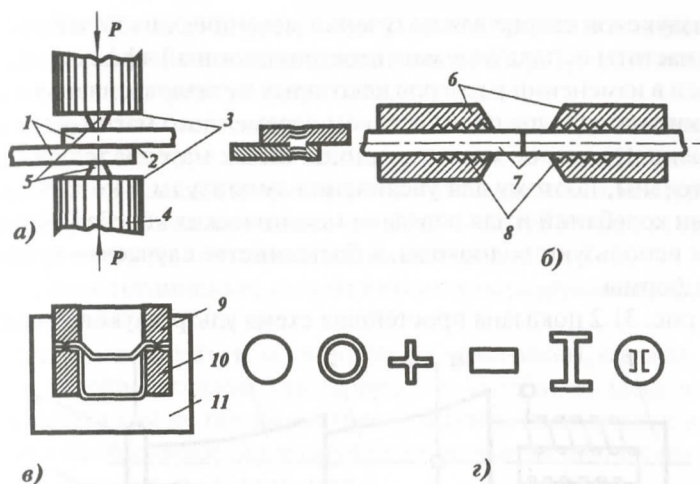


Рис. 31.1. Принципиальная схема холодной сварки:

а — точечная; *б* — стыковая; *в* — по контуру; *г* — формы сварной точки

катывания ролика. Швы, образующие замкнутый контур небольшой длины в виде кольца, прямоугольника и т.п., получают контурной сваркой. На рис. 31.1, *в* приведена схема сварки полых деталей по контуру. Пуансоны *9* и *10* строго центрируют с помощью корпуса *11*.

Холодной сваркой в основном сваривают металлы и сплавы, обладающие высокой пластичностью при комнатной температуре, с крупнозернистой отожженной структурой.

В недостаточно пластичных металлах при больших деформациях могут образоваться трещины. Высокопрочные металлы и сплавы холодной сваркой не сваривают, так как для этого требуются очень большие удельные давления, которые практически трудно осуществить.

Хорошо свариваются сплавы алюминия, дюралюминия, сплавы кадмия, свинца, меди, никеля, золота, серебра, цинка и подобные металлы и сплавы в однородных сечениях.

31.2. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ СВАРКА

Ультразвуковая сварка относится к процессам, в которых используют давление и взаимное трение свариваемых поверхностей. Силы трения возникают в результате действия на заготовки, сжатые осевой силой *P*, механических колебаний с ультразвуковой частотой. При

ультразвуковой сварке для получения механических колебаний высокой частоты используют магнитострикционный эффект, заключающийся в изменении размеров некоторых металлов, сплавов и керамических материалов под действием переменного магнитного поля. Изменения размеров магнитострикционных материалов очень незначительны, поэтому для увеличения амплитуды и концентрации энергии колебаний и для передачи механических колебаний к месту сварки используют волноводы, в большинстве случаев — суживающейся формы.

На рис. 31.2 показана простейшая схема ультразвуковой сварки.

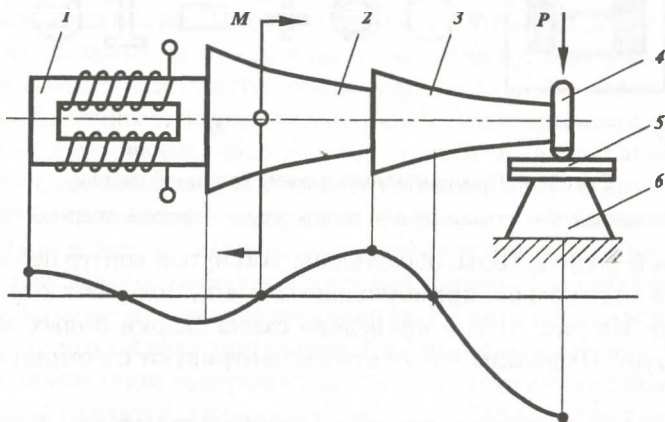


Рис. 31.2. Принципиальная схема ультразвуковой сварки

Свариваемые заготовки 5 размещают на опоре 6. Наконечник 4 рабочего инструмента 3 соединен с двигателем магнитострикционного преобразования 1 через трансформатор 2 продольных упругих колебаний, представляющих вместе с рабочим инструментом волновод. Нормальная сжимающая P создается моментом M в узле колебаний. В результате ультразвуковых колебаний в тонких слоях контактирующих поверхностей создаются сдвиговые деформации, разрушающие поверхностные пленки.

При сближении чистых поверхностей на расстоянии действия межатомных сил между ними возникает прочная связь.

Сравнительно небольшое тепловое воздействие на свариваемые материалы, возникающее из-за трения поверхности одной детали о поверхность другой, обеспечивает минимальное изменение их структуры, механических и других свойств. Например, при сварке меди температура в зоне контакта не превышает $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, а при сварке

алюминия — 200–300 °С. Это особенно важно при сварке химически активных металлов, а также металлов, которые в результате высокотемпературного нагрева разрушаются.

Ультразвуковой сваркой можно получать точечные и шовные соединения внахлестку, а также соединение по контуру. Шовные соединения получают на машинах, аналогичных машинам для точечной сварки. Отличие заключается в том, что их рабочий инструмент и опору выполняют в форме роликов.

Прочность соединения, выполненного ультразвуковой сваркой, достаточно высока.

Ультразвуковым методом сваривают и пластмассы, однако, в отличие от сварки металлов, ультразвуковые колебания здесь подводятся к заготовкам не тангенциально, а вертикально, так как в этом случае нет необходимости в разрушении оксидных пленок (их нет), а нужен только нагрев соединения.

Ультразвуковую сварку применяют в приборостроении, радиоэлектронике, авиационной промышленности и ряде других отраслей.

31.3. СВАРКА ВЗРЫВОМ

Сварка взрывом основана на использовании направленного взрыва (рис. 31.3). Соединяемые поверхности двух заготовок 4 и 3, в частности пластин, одна из которых неподвижна и является основанием, располагают под углом друг к другу на расстоянии h_0 . На заготовку 3 кладут взрывчатое вещество 2 толщиной H , а со стороны,

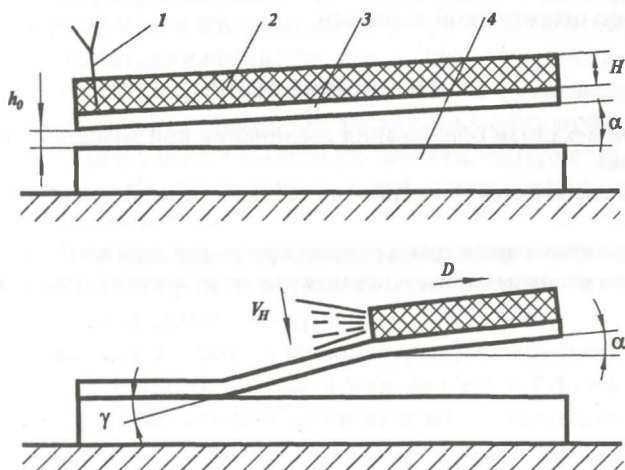


Рис. 31.3. Принципиальная схема сварки взрывом

находящейся над вершиной угла, устанавливают детонатор 1. Сваривают на жесткой опоре. Давление в продуктах детонации, возникающее в результате взрыва, сообщает импульс расположенной под зарядом пластине.

Заготовка 3 отбрасывается взрывом со скоростью 1000 м/с на поверхность неподвижной пластины. В месте соударения заготовки с пластиной образуется угол α , который перемещается вдоль соединяемых поверхностей. При соударении из вершины угла выдуваются оксидные пленки и другие загрязнения. Соударение пластин вызывает течение металла в их поверхностных слоях. Поверхности сближаются до расстояния действия межатомных сил сцепления, и происходит схватывание по всей площади соединения. Продолжительность сварки взрывом не превышает нескольких микросекунд.

Прочность соединений, выполненных сваркой взрывом, выше прочности соединяемых материалов. Разрушение при испытании происходит на некотором расстоянии от плоскости соединения по наименее прочному металлу. Это объясняется упрочнением тонких слоев металла, прилегающих к соединенным поверхностям, при их пластической деформации. Параметрами сварки взрывом являются скорость детонации V_d , нормальная скорость V_n метаемой пластины при соударении с основанием. Сварку взрывом используют при изготовлении заготовок для проката биметалла, плакировке поверхностей конструкционных сталей металлами и сплавами с особыми физическими и химическими свойствами, при сварке заготовок из разнородных материалов. Целесообразно сочетание сварки взрывом со штамповкой и ковкой.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каков механизм образования соединения при холодной сварке металлов?
2. В чем заключается роль ультразвуковых колебаний при ультразвуковой сварке?
3. Что является параметрами режима при сварке взрывом?
4. Каковы основные области применения механических способов сварки?

Глава 32

ПАЙКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

32.1. ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ ПРОЦЕССА ПАЙКИ

Пайкой называется технологический процесс соединения металлических заготовок без их расплавления посредством введения между ними расплавленного промежуточного металла — припоя. Припой имеет температуру плавления более низкую, чем температура соединяемых металлов, и заполняет зазор между соединяемыми поверхностями за счет действия капиллярных сил. При охлаждении припой кристаллизуется и образует прочную связь между заготовками. В процессе пайки наряду с нагревом необходимо удалять оксидные пленки с поверхности паяемых металлов, например с помощью флюсов.

Пайка включает нагрев материала, образующего соединение, до температуры, близкой к температуре плавления припоя; расплавление и растекание жидкого припоя по поверхности твердого материала; заполнение паяемого шва; охлаждение и кристаллизацию припоя в паяном шве. Качество паяного шва во многом зависит от прочности связи припоя с металлом основы. В результате смачивания твердой металлической поверхности между припоем и основным металлом возникает межатомная связь. Эта связь может образоваться при растворении металла основы в расплавленном припое с образованием жидкого раствора, распадающегося при последующей кристаллизации; за счет диффузии составляющих припой элементов в основной твердый металл с образованием твердого раствора; за счет реактивной диффузии между припоем и основным металлом с образованием по границе интерметаллических соединений; за счет бездиффузионной связи в результате межатомного взаимодействия.

По особенностям процесса и технологии пайку можно разделить на капиллярную, диффузионную, контактно-реактивную, реактивно-флюсовую и сварку-пайку.

Капиллярная пайка. Припой заполняет зазор между соединяемыми поверхностями и удерживается в нем за счет капиллярных сил. На рис. 32.1 показана схема образования шва. Соединение образуется в результате растворения основы в жидком припое и последующей кристаллизации раствора.

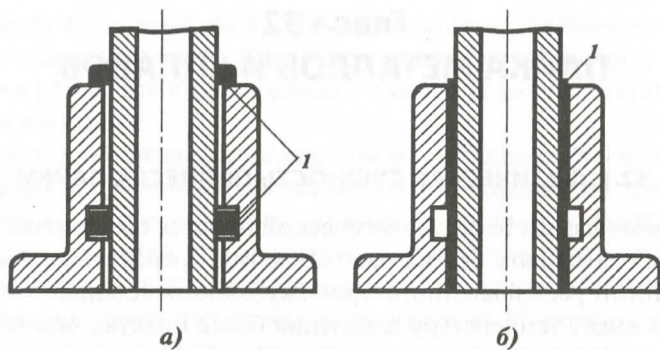


Рис. 32.1. Схема капиллярной пайки:

а — перед пайкой; б — после пайки; 1 — припой

Капиллярную пайку используют в тех случаях, когда применяют соединение внахлестку. Однако капиллярное явление присуще большинству видов пайки.

Диффузионная пайка. Соединение образуется за счет взаимной диффузии компонентов припоя и паяных материалов, причем возможно образование в шве твердого раствора или тугоплавких хрупких интерметаллов. Для диффузионной пайки необходима продолжительная выдержка при температуре образования паяного шва и после завершения процесса при температуре ниже солидуса припоя. За счет этого можно увеличить прочность шва и температуру распая, а значит, и рабочую температуру соединения.

Контактно-реактивная пайка. При пайке между соединяемыми металлами или соединяемыми металлами и прослойкой другого металла в результате контактного взаимодействия и плавления образуется сплав, который заполняет зазор и при кристаллизации образует паяное соединение.

Реактивно-флюсовая пайка. Припой образуется за счет реакции вытеснения между основным металлом и флюсом. Например, при пайке алюминия с флюсом $3\text{ZnCl}_2 + 2\text{Al} \rightarrow 2\text{AlCl}_3 + 3\text{Zn}$ восстановленный цинк является припоем. Реактивно-флюсовую пайку можно вести без припоя и с припоем.

Сварка-пайка. Паяное соединение образуется так же, как при сварке плавлением, но в качестве припоя используется расплавленный металл одной из соединяемых деталей — той, металл которой наименее тугоплавкий и который частично расплавляется в месте соединения. Такой вид сварки относят к некапиллярному.

32.2. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПАЙКИ

Припой. Припои для пайки должны отвечать следующим требованиям:

- температура их плавления должна быть ниже температуры плавления паяемых материалов;
- они должны хорошо смачивать паяемый материал и легко растекаться по его поверхности;
- они должны быть достаточно прочными и обеспечивать герметичность;
- коэффициенты термического расширения припоя и паяемого материала не должны резко различаться.

Все припои по температуре плавления подразделяют на низкотемпературные (температура плавления ниже 500 °С), или мягкие, и высокотемпературные (температура плавления выше 500 °С), или твердые. Припои изготавливают в виде прутков, проволок, листов, полос, спиралей, колец, дисков, зерен, укладываемых в место соединения.

К низкотемпературным, или мягким, припоям относятся оловянно-свинцовые, на основе висмута, индия, кадмия, цинка, олова, свинца. К высокотемпературным, или твердым, припоям относятся медные, медно-цинковые, медно-никелевые, с благородными металлами (серебром, золотом, платиной).

Легкоплавкие припои широко применяют во всех отраслях промышленности и в быту. Они представляют собой сплавы на основе олова, свинца, кадмия и висмута. Наибольшее распространение получили оловянно-свинцовые припои, отличающиеся высокой смачивающей способностью, хорошим сопротивлением коррозии, хорошей электропроводностью.

Из тугоплавких (твердых) припоев широко применяют медно-цинковые и серебряные припои с добавками олова, марганца, алюминия, железа и других металлов.

Медно-цинковые припои выпускают трех марок: ПМЦ-36 — для паяния латуни, содержащей 60–68% Cu; ПМЦ-48 — для паяния медных сплавов, содержащих свыше 68% Cu; ПМЦ-54 — для паяния бронзы, меди и стали. В обозначении марки цифры указывают на процентное содержание меди. Медно-цинковые припои плавятся при 700–830 °С.

Соединения, паянные медью и припоями на ее основе, имеют высокую коррозионную стойкость и, как правило, высокие механические свойства. Температура паяния припоями на основе меди составляет 900–1130 °С.

Серебряные припои изготавливают следующих марок: ПСр72, ПСр50Кд, ПСр3Кд, ПСр2 и др. Цифры в обозначении марки указывают на процентное содержание серебра; буквосочетание «Кд» означает кадмий. Серебряные припои плавятся при температуре 630–1000 °С.

Флюс. Возможное окисление соединяемых поверхностей при нагревании предотвращается флюсом, который создает жидкую и газообразную защиту зоны пайки от окружающего воздуха. Кроме этого, флюс очищает поверхности паяемых заготовок от окисных пленок и способствует лучшему заполнению расплавленным припоем зазоров между спаиваемыми заготовками.

Для паяния мягкими припоями применяют различные сложные флюсы, в состав которых входят хлорид цинка, ортофосфорная кислота, глицерин, вазелин, спирт, канифоль и др. Часто при выполнении монтажных соединений в качестве флюса используют канифоль без каких-либо добавок.

При паянии твердыми припоями флюсом часто служит бура ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) в виде порошка или пасты, замешенной на воде или спирте.

Флюс (кроме реактивно-флюсовой пайки) не должен химически взаимодействовать с припоем. Температура плавления флюса ниже температуры плавления припоя. Флюс в расплавленном и газообразном состояниях должен способствовать смачиванию поверхности основного металла расплавленным припоем. Флюсы могут быть твердые, пастообразные, жидкие и газообразные.

Наиболее распространенными паяльными флюсами являются бура ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$), борная кислота (H_3BO_3), хлористый цинк (ZnCl_2), фтористый калий (KF) и другие галлоидные соли щелочных металлов.

32.3. СПОСОБЫ ПАЙКИ

За основу классификации способов пайки могут братья разные признаки: по удалению оксидных пленок, по характеру кристаллизации полного шва, по получению припоя, по заполнению зазора, по источнику нагрева при пайке. Наибольшее распространение получила классификация, в основу которой положены используемые источники нагрева.

Пайка в печах. Нагревают соединяемые заготовки в специальных печах: электросопротивлением, индукционным нагревом, в газопламенных и газовых. Припой заранее закладывают в шов собранного

изделия, на место пайки наносят флюс и затем помещают в печь, где это изделие нагревают до температуры пайки. Этот способ обеспечивает равномерный нагрев соединяемых деталей, без заметной их деформации.

Крупные детали паяют в камерных печах с неподвижным подом, большую партию мелких деталей — в печах с сетчатым конвейером или роликовым подом. Пайка в печах позволяет механизировать паяльные работы и обеспечивает стабильное качество изделий и высокую производительность труда.

Индукционная пайка. Паяемый участок нагревают в катушке-индукторе. Через индуктор пропускают ТВЧ, в результате чего место пайки нагревается до необходимой температуры. Для предохранения от окисления изделие нагревают в вакууме или в защитной среде с применением флюсов. Формы и размеры индуктора зависят от конструкции паемого изделия.

Пайка сопротивлением. Соединяемые заготовки нагревают теплотой, выделяющейся при прохождении электрического тока через паяемые детали и токоподводящие элементы. Соединяемые детали являются частью электрической цепи. Нагрев сопротивлением можно осуществлять на контактных сварочных машинах.

Пайка погружением. Эту пайку выполняют в ваннах с расплавленными солями или припоями. Соляная смесь обычно состоит из 55% KCl и 45% HCl, температура ванны — 700–800 °С. На паяемую поверхность, предварительно очищенную от грязи и жира, наносят флюс, между кромками или около места соединения размещают припой, затем детали скрепляют и погружают в ванну. Соляная ванна предохраняет место пайки от окисления. Перед погружением в ванну с расплавленным припоем покрытые флюсом детали нагревают до 550 °С. Поверхности, не подлежащие пайке, защищают от контакта с припоем специальной обмазкой из графита с добавками небольшого количества извести. На этот процесс расходуется большое количество припоя. Разновидностью пайки погружением является пайка бегущей волной припоя, когда расплавленный припой подается насосом и образует волну над расплавом. Паяемую деталь перемещают над уровнем расплава в горизонтальном направлении. В момент касания волны припоя происходит пайка. Бегущей волной паяют в радиоэлектронной промышленности при производстве печатного радиомонтажа.

Пайка с радиационным нагревом. Пайку выполняют за счет излучения кварцевых ламп, расфокусированного электронного луча или мощного светового потока от квантового генератора (лазера).

Газоплазменная пайка. Паяемые заготовки нагревают и припой расплавляют газосварочными и плазменными горелками. Газовые горелки обладают наибольшей универсальностью. В качестве горючих газов используют ацетилен, природные газы, водород, пары керосина и т.п.

Пайка паяльниками. Основной металл нагревают и припой расплавляют за счет теплоты, аккумулированной в массе металла паяльника, который перед пайкой или в процессе ее подогревают. Ультразвуковые паяльники применяют для бесфлюсовой низкотемпературной пайки на воздухе и для пайки алюминия. Оксидные пленки разрушаются в этом случае за счет колебаний ультразвуковой частоты.

Абразивными паяльниками можно паять алюминиевые сплавы без флюса. Оксидная пленка удаляется в результате трения паяльника об обрабатываемую поверхность. Абразивный паяльник в отличие от электропаяльника имеет рабочий стержень, изготовленный прессованием из порошка припоя и измельченного асбеста.

32.4. ТИПЫ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Основными типами паяных соединений являются нахлесточные, так как за счет увеличения перекрытия заготовок можно увеличить прочность соединения. Стыковые соединения применяют реже из-за их меньшей прочности. Остальные разновидности соединений являются комбинациями перечисленных. Например, плоские элементы могут быть соединены внахлестку (рис. 32.2, *а*), ступенчатым (рис. 32.2, *б*), гребенчатым (рис. 32.2, *в*), косостыковым (рис. 32.2, *г*), стыковым (рис. 32.2, *д*) и тавровым (рис. 32.2, *е*) соединениями.

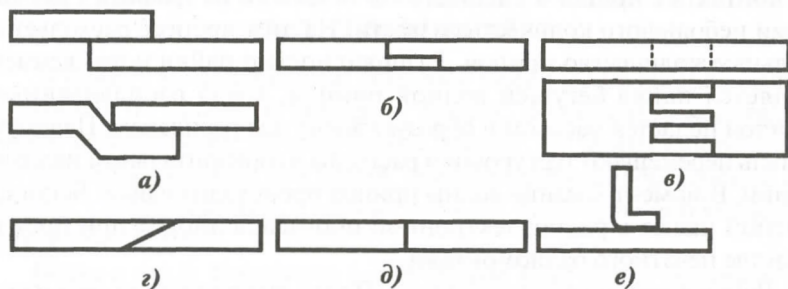


Рис. 32.2. Типы паяных соединений для предотвращения перекосов и относительных смещений

Криволинейные поверхности соединяют между собой и с плоскими поверхностями в сотовых конструкциях, в панелях с гофрированными проставками и т.п. Эти соединения используют в самолетостроении и для изготовления теплообменников.

К паяным соединениям в зависимости от назначения изделия кроме общих требований могут быть предъявлены и специальные — по герметичности, электропроводности, коррозионной стойкости и т.п. Сборочные части изделий перед пайкой должны быть прочно соединены между собой для предотвращения перекосов и относительных смещений.

32.5. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ И ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Дефекты бывают внешние и внутренние. В сварных соединениях к внешним дефектам относят наплывы, подрезы, наружные несплавления и несплавления, поверхностные трещины и поры (рис. 32.3, а–е), к внутренним — скрытые трещины и поры, внутренние несплавления и несплавления, шлаковые включения и др. (рис. 32.3, д–ж). В паяных соединениях внешними дефектами являются наплывы и натеки припоя, неполное заполнение шва припоем, внутренними — поры, включения флюса, трещины и др.

Качество сварных и паяных соединений обеспечивается предварительным контролем материалов и заготовок перед сваркой, текущим контролем за процессом сварки и пайки, окончательным

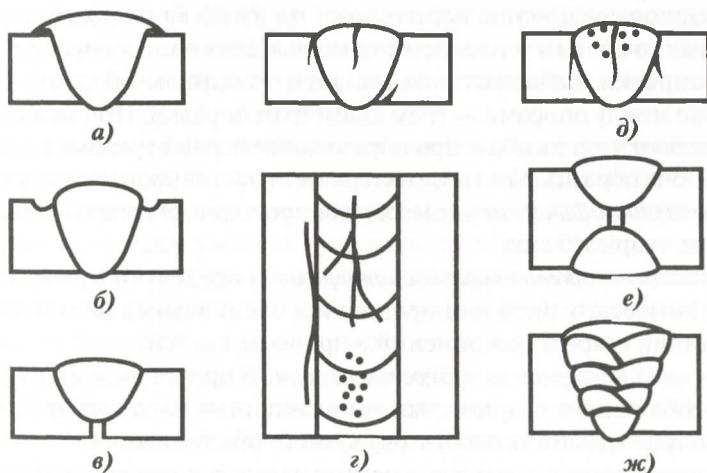


Рис. 32.3. Виды дефектов в сварных соединениях

контролем готовых сварных или паяных соединений. В зависимости от того, нарушается или не нарушается целостность сварного соединения при контроле, различают разрушающие и неразрушающие методы контроля.

Предварительный контроль материалов и заготовок. При контроле основного и сварочных материалов устанавливают, удовлетворяют ли сертификатные данные в документах заводов-поставщиков требованиям, предъявляемым в соответствии с назначением и ответственностью сварных узлов и конструкций. Осматривают поверхности основного металла, сварочной проволоки и покрытий электродов с целью обнаружения внешних дефектов и повреждений. Перед сборкой и сваркой заготовок проверяют, соответствуют ли их формы и габаритные размеры установленным, а также контролируют качество подготовки кромок и свариваемых поверхностей.

При изготовлении ответственных конструкций сваривают контрольные образцы. Из них вырезают образцы для механических испытаний. По результатам испытаний оценивают качество основного и сварочного материалов, а также квалификацию сварщиков, допущенных к сварке данных конструкций.

Механические испытания сварных соединений предусматривают статические испытания на растяжение и изгиб и испытания на ударную вязкость наплавленного металла и различных участков сварного соединения. При испытаниях определяют пределы $\sigma_{0,2}$ и σ_B , относительное удлинение δ и сужение Ψ , угол загиба α и ударную вязкость a_n .

Сварное соединение испытывают на изгиб на плоских сварных образцах со снятым усилением с помощью двух опор и оправки. Диаметр оправки выбирают равным двум толщинам образца, а расстояние между опорами — трем диаметрам оправки. При испытании определяют угол загиба α при образовании первой трещины в растянутой зоне образца. Угол α характеризует пластичность сварного шва.

Металлографические исследования проводят на макро- и микрошлифах сварного шва.

Стойкость против образования трещин определяют путем сварки технологических проб или проведения специальных механических испытаний сварных соединений в процессе сварки.

Текущий контроль за процессом сварки. В процессе сварки проверяют соблюдение сварщиками установленных параметров режима сварки и исправность работы сварочного оборудования.

Окончательный контроль готовых сварных и паяных соединений. Готовые сварные соединения подвергают следующим видам

контроля: внешнему осмотру для выявления поверхностных дефектов и обмеру сварных швов; испытаниям на плотность; магнитному контролю; просвечиванию рентгеновскими и гамма-лучами, ультразвуком для выявления внутренних дефектов. Паяные соединения подвергают внешнему осмотру, испытаниям на плотность, магнитному и ультразвуковому контролю. Вид контроля и относительную протяженность контролируемых швов выбирают в зависимости от назначения и ответственности сварной или паяной конструкции.

Емкости для хранения жидкостей, сосуды и трубопроводы, работающие при избыточном давлении, испытывают на плотность путем гидравлических и пневматических испытаний, керосином и с помощью течеискателей.

При гидравлическом испытании емкости наполняют водой, а в сосудах и трубопроводах создают избыточное давление жидкости, превышающее в 1,5–2 раза рабочее давление. В таком состоянии изделие выдерживают в течение 5–10 мин. Швы осматривают с целью обнаружения течи, капель и отпотеваний.

При пневматическом испытании в сосуды нагнетают сжатый воздух под давлением, которое на 0,01–0,02 МПа превышает атмосферное. Соединение смачивают мыльным раствором или опускают в воду. Наличие неплотности в швах определяют по мыльным пузырькам или пузырькам воздуха.

При испытании с помощью *течеискателей* внутри сосуда создают вакуум, а снаружи швы обдувают смесью воздуха с гелием. При наличии неплотностей гелий проникает в сосуд, откуда отсасывается в течеискатель со специальной аппаратурой для его обнаружения. По количеству уловленного гелия судят о неплотности сварных и паяных швов.

При испытании *керосином* швы емкостей с одной стороны смазывают керосином, с другой — мелом. При наличии неплотности на поверхности шва, окрашенной мелом, появляются темные пятна керосина. Благодаря высокой проникающей способности керосина можно обнаружить поры диаметром в несколько микрон.

Магнитный контроль основан на намагничивании сварных или паяных соединений и обнаружении полей магнитного рассеяния на дефектных участках. Изделие намагничивают, замыкая им сердечник электромагнита или помещая его внутрь соленоида. В зависимости от способа обнаружения потоков рассеяния различают методы магнитного порошка, индукционный и магнитографический. При методе магнитного порошка на поверхность соединения на-

носят порошок железной окалины или его масляную суспензию. По скоплению порошка обнаруживают дефекты, залегающие на глубине до 6 мм. При индукционном методе магнитный поток в изделии наводится электромагнитом переменного тока. Рассеяние поля обнаруживают с помощью искателя, в катушке которого индуцируется э.д.с., вызывающая оптический или звуковой сигнал на индикаторе. При магнитографическом методе на шов накладывают и прижимают к нему ферромагнитную ленту, на которой фиксируется магнитное изображение шва. Затем это изображение воспроизводится на экране электронно-лучевой трубки.

Рентгеновское просвечивание основано на различном поглощении рентгеновских лучей участками металла с дефектами или без них. Сварные соединения просвечивают с помощью специальных рентгеновских аппаратов. С одной стороны шва 3 на некотором расстоянии от него помещают рентгеновскую трубку 1, с другой стороны к нему плотно прижимают кассету 4 с рентгеновской пленкой (рис. 32.4, а). При просвечивании рентгеновские лучи 2 проходят через сварное соединение и облучают пленку. После проявления пленки на ней фиксируют участки, отличные по интенсивности от основного фона, которые соответствуют дефектным местам в сварном соединении. Вид и размер дефектов определяют сравнением пленки с эталонными снимками.

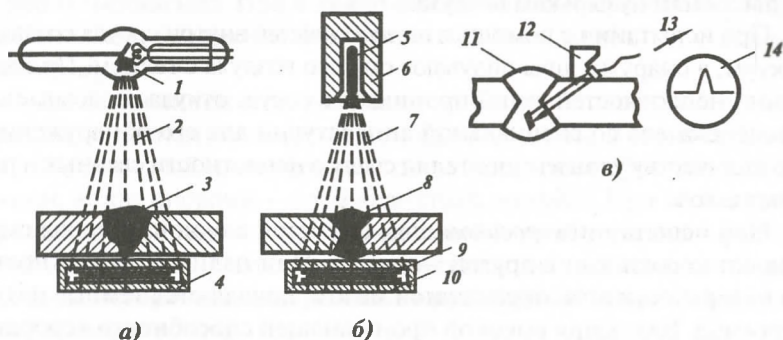


Рис. 32.4. Методы контроля сварных соединений:

а — рентгеновский, б — гамма-излучением, в — ультразвуковой

Просвечиванием можно обнаружить большинство внутренних дефектов: крупные трещины, параллельные направлению рентгеновских лучей, непровары, поры, шлаковые и другие включения. При этом фиксируют дефекты, размеры которых составляют 2% от толщины металла.

При просвечивании сварных соединений гамма-лучами источником излучений служат радиоактивные изотопы. Ампулу с радиоактивным изотопом 5 помещают в свинцовый контейнер 6 (рис. 32.4, б). Техника просвечивания сварных соединений 8 гамма-лучами 7 подобна технике рентгеновского просвечивания. Этим способом выявляют аналогичные внутренние дефекты по потемнению участков пленки 9, помещенной в кассету 10.

Просвечивание гамма-лучами по сравнению с рентгеновскими имеет ряд преимуществ. Благодаря портативности аппаратуры этот метод можно применять в любых условиях и для изделий больших толщин. Кроме того, просвечивание гамма-лучами — менее дорогостоящий способ.

Ультразвуковой контроль основан на способности ультразвуковых волн отражаться от поверхности раздела двух сред. С помощью пьезометрического щупа 12 ультразвукового дефектоскопа 13, помещаемого на поверхность сварного или паяного соединения, в металл 11 посылают ультразвуковые колебания (рис. 32.4, в). При встрече с поверхностью дефекта возникает отраженная ультразвуковая волна. После усиления сигнал подается на трубку осциллографа и фиксирует наличие дефекта в соединении в виде пика 14 на его экране.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какова сущность процесса пайки и каковы его особенности по сравнению со сваркой?
2. По каким признакам и как классифицируют методы пайки?
3. Какие материалы необходимы для пайки?
4. Перечислите методы пайки по способу нагрева.
5. Какие типы соединений рекомендованы для пайки?
6. Назовите наиболее часто встречающиеся дефекты сварных соединений и методы их контроля.

Раздел X

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Глава 33

КЛАССИФИКАЦИЯ, ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ

33.1. СУЩНОСТЬ ПРОЦЕССА

Обработка металлов резанием — это процесс срезания режущим инструментом с поверхности заготовки слоя металла для получения требуемой геометрической формы, точности размеров и шероховатости поверхностей детали.

Все способы размерной обработки деталей классифицируют по виду используемой энергии на *механические, физико-химические и комбинированные* (рис. 33.1). Для осуществления процесса резания необходимо наличие относительных движений между заготовкой и режущим инструментом. Каждый станок имеет рабочие органы (шпиндели, суппорты, столы и т.д.), которым сообщаются движения, определяемые назначением станка и характером выполняемых видов обработки. Движения рабочих органов станков подразделяют на движения резания, установочные и вспомогательные. Движение, при котором с обрабатываемой заготовки срезается слой металла и изменяется состояние обработанной поверхности, называют *движением резания*, к которому относят главное движение и движение подачи. Движение, определяющее скорость отделения стружки, принимают за *главное движение* — скорость резания. Движение, обеспечивающее непрерывность врезания режущего лезвия инструмента в новые слои материала, называют движением подачи, а движение рабочих органов станка, обеспечивающее такое положение инструмента относительно заготовки, при котором с нее срезается определенный слой металла, — *установочным движением*. На схемах обработки его обозначают S_r .



Рис. 33.1. Классификация способов обработки металлов резанием

Движения рабочих органов станка, которые не имеют непосредственного отношения к процессу резания и служат для транспортировки и закрепления заготовки или инструмента, быстрых перемещений рабочих органов, переключения скоростей резания и подачи и т.д., относятся к вспомогательным движениям.

В процессе обработки на заготовке различают (рис. 33.2) обрабатываемую поверхность 1, с которой предстоит срезать слой материала, обработанную поверхность 3, с которой уже срезан слой материала и превращен в стружку, и поверхность резания 2, обра-

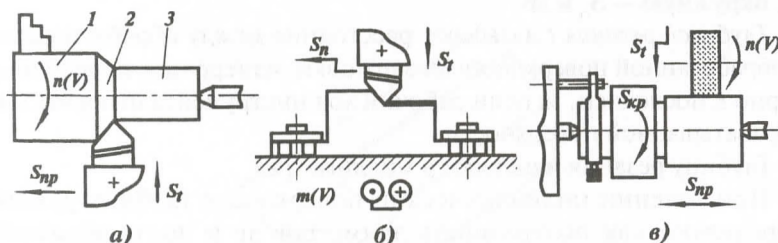


Рис. 33.2. Схемы обработки заготовок:

а — точением; б — строганием; в — шлифованием: S_{np} — продольная подача; S_n — поперечная подача; S_t — установочное движение

зованную главным режущим лезвием инструмента и являющуюся переходной между обрабатываемой и обработанной поверхностями.

Элементами процесса резания являются скорость резания, подача и глубина резания. Совокупность этих величин составляет параметры режимов резания.

Первый из них — скорость резания V — путь точки режущего лезвия инструмента относительно заготовки в направлении главного движения в единицу времени. Скорость резания измеряют в м/мин при всех видах обработки резанием, кроме шлифования, полирования и некоторых других, где ее измеряют в м/с. Если главное движение является вращательным, то скорость резания, м/мин

$$V = \pi D_{\text{заг}} / 1000,$$

где $D_{\text{заг}}$ — наибольший диаметр обрабатываемой поверхности заготовки, мм; π — частота вращения заготовки, об/мин.

Если главное движение является возвратно-поступательным, причем скорости рабочего и холостого ходов разные, то средняя скорость, м/мин

$$V_{\text{ср}} = Lm(k + 1)/1000,$$

где L — расчетная длина хода резца, мм; m — число двойных ходов резца, мин; k — коэффициент, характеризующий отношение скорости рабочего и холостого ходов:

$$k = V_{\text{раб}} / V_{\text{хол}}.$$

Подачей S называют путь режущего лезвия инструмента (рис. 33.3) относительно заготовки в направлении движения инструмента за один оборот или за один двойной ход заготовки или инструмента. Различают подачи: продольную — $S_{\text{пр}}$, поперечную — $S_{\text{п}}$, вертикальную — $S_{\text{в}}$, наклонную — $S_{\text{н}}$, круговую — $S_{\text{кр}}$, тангенциальную — $S_{\text{т}}$, окружную — $S_{\text{о}}$ и др.

Глубиной резания t называют расстояние между обрабатываемой и обработанной поверхностями заготовки, измеренное перпендикулярно к последней, за один рабочий ход инструмента относительно обрабатываемой поверхности.

Глубину резания измеряют в миллиметрах.

При точении цилиндрической поверхности глубину резания определяют как полуразность диаметров до и после обработки (рис. 33.3):

$$t = (D_{\text{заг}} - d)/2,$$

где d — диаметр обработанной цилиндрической поверхности, мм.

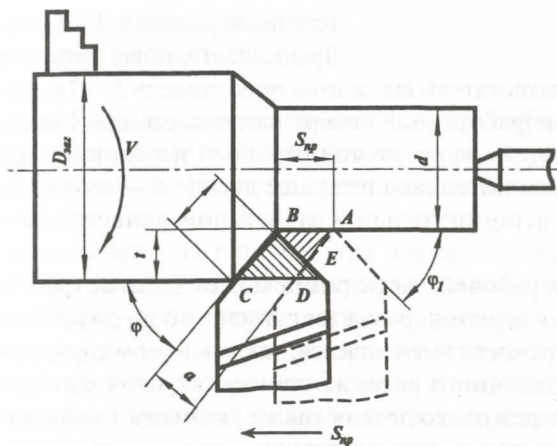


Рис. 33.3. Элементы резания и геометрии срезаемого слоя

При рассмотрении физической сущности процесса резания используют понятия ширины и толщины срезаемого слоя материала. *Ширина срезаемого слоя b* — расстояние между обрабатываемой и обработанной поверхностями, измеренное по поверхности резания.

Толщина срезаемого слоя a — расстояние, измеренное по нормали к поверхности резания, между двумя последовательными положениями поверхности резания за время одного оборота заготовки.

Элементы и геометрия токарного проходного резца. Токарный прямой проходной резец (рис. 33.4) состоит из двух частей: рабочей и стержня. Стержень имеет квадратную или прямоугольную форму поперечного сечения и служит для закрепления резца в резцедержателе станка. Рабочая часть резца выполняет работу резания и состоит из нескольких элементов. Передняя поверхность I — поверхность,

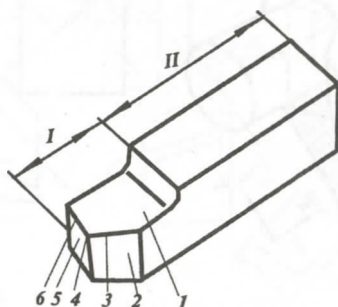


Рис. 33.4. Элементы токарного прямого проходного резца

по которой сходит стружка в процессе резания. Главная задняя поверхность 2 — поверхность, обращенная к поверхности резания заготовки. Вспомогательная задняя поверхность 5 — поверхность, обращенная к обработанной поверхности заготовки. Главное режущее лезвие 3 — линия пересечения передней и главной задней поверхностей. Вспомогательное режущее лезвие 6 — линия пересечения передней и вспомогательной задней поверхностей; 4 — вершина резца.

Вершина рабочей части резца может быть острой или закругленной. Если вершина резца закруглена, то шероховатость обработанной поверхности уменьшается, так как в этом случае уменьшается площадь остаточного сечения срезаемого слоя металла. Наличие переходного режущего лезвия также уменьшает шероховатость обработанной поверхности заготовки.

Чтобы выполнять работу резания, рабочей части режущего инструмента придают форму клина. Для этого инструмент затачивают по передней и задней поверхностям. Для определения углов, под которыми располагаются поверхности рабочей части инструмента относительно друг друга, вводят координатные плоскости.

Основная плоскость (ОП) — плоскость, параллельная направлениям продольной и поперечной подачи. У токарных резцов за основную плоскость принимают плоскость, проходящую через основание стержня (рис. 33.5, а).

Плоскость резания (ПР) проходит через главное режущее лезвие резца касательно к поверхности резания заготовки.

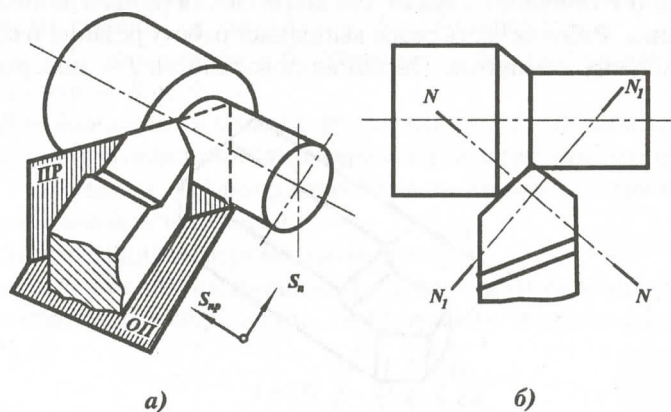


Рис. 33.5. Координатные плоскости

Главная секущая плоскость ($N-N$) — плоскость, перпендикулярная к проекции главного режущего лезвия на основную плоскость (рис. 33.5, б).

Вспомогательная секущая плоскость (N_1-N_1) — плоскость, перпендикулярная к проекции вспомогательного режущего лезвия на основную плоскость. На рис. 33.5, б показаны следы плоскостей $N-N$ и N_1-N_1 .

Углы резца определяют положение элементов рабочей части в пространстве относительно координатных плоскостей и относительно друг друга. Знание углов инструмента необходимо для его изготовления в металле. Кроме того, углы инструмента оказывают существенное влияние на процесс резания и качество обработки. У токарного резца различают главные и вспомогательные углы, которые рассматривают исходя из предположения, что ось стержня резца перпендикулярна к линии центров токарного станка: вершина резца находится на линии центров станка. Углы токарного прямого проходного резца показаны на рис. 33.6.

Главный передний угол γ измеряют в главной секущей плоскости между следами передней поверхности и плоскости, перпендикулярной к следу плоскости резания. В дальнейшем угол γ будем называть передним углом.

Передний угол γ оказывает большое влияние на процесс резания материала. С увеличением угла γ уменьшается деформация срезае-

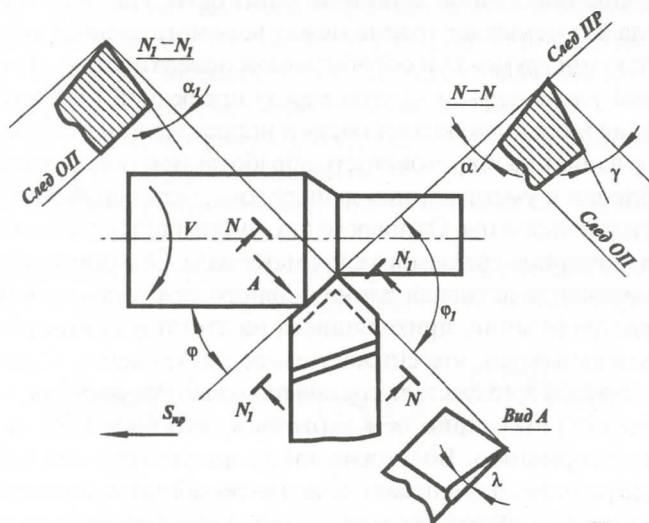


Рис. 33.6. Углы резца в статике

мого слоя, так как инструмент легче врезается в материал, снижаются сила резания и расход мощности. Одновременно улучшаются условия схода стружки и повышается качество обработанной поверхности заготовки.

Однако чрезмерное увеличение угла γ приводит к ослаблению главного режущего лезвия, снижению его прочности, увеличению износа вследствие выкрашивания, ухудшению условий теплоотвода от режущего лезвия.

При обработке хрупких и твердых материалов для повышения прочности и увеличения времени работы инструмента следует использовать резцы с меньшими передними углами, при обработке мягких и вязких материалов передний угол может быть больше.

Главный задний угол α измеряют в главной секущей плоскости между следами плоскости резания и главной задней поверхности. Наличие угла α_1 уменьшает трение между главной задней поверхностью инструмента и поверхностью резания заготовки, вследствие чего уменьшается износ инструмента по главной задней поверхности. Увеличение угла α приводит к снижению прочности режущего лезвия. Угол α назначают исходя из величины упругого деформирования обрабатываемого материала.

Вспомогательный задний угол α_1 измеряют во вспомогательной секущей плоскости между следами вспомогательной задней поверхности и плоскости, проходящей через вспомогательное режущее лезвие перпендикулярно основной плоскости. Наличие у инструмента угла α_1 уменьшает трение между вспомогательной задней поверхностью инструмента и обработанной поверхностью заготовки.

Главный угол в плане ϕ — угол между проекцией главного режущего лезвия на основную плоскость и направлением подачи.

Угол ϕ влияет на шероховатость обработанной поверхности заготовки. Однако с уменьшением ϕ шероховатость обработанной поверхности уменьшается. Одновременно уменьшается толщина и увеличивается ширина срезаемого слоя материала. Это приводит к тому, что увеличивается активная длина главного режущего лезвия. Сила и температура резания, приходящиеся на единицу длины режущего лезвия, уменьшаются, что снижает износ инструмента. С уменьшением угла ϕ резко возрастает составляющая силы резания, направленная перпендикулярно оси заготовки, что вызывает ее повышенную деформацию. Возможно также возникновение вибраций в процессе резания, что снижает качество обработанной поверхности.

Вспомогательный угол в плане ϕ_1 — угол между проекцией вспомогательного режущего лезвия на основную плоскость и направлением

подачи. С уменьшением угла ϕ_1 шероховатость обработанной поверхности уменьшается, одновременно увеличивается прочность вершины резца и снижается его износ.

Угол наклона главного режущего лезвия λ измеряют в плоскости, проходящей через главное режущее лезвие резца перпендикулярно основной плоскости, между главным режущим лезвием и линией, проведенной через вершину резца параллельно основной плоскости.

Угол λ может быть положительным, отрицательным и равным нулю (рис. 33.7, а–в), что влияет на направление схода стружки.

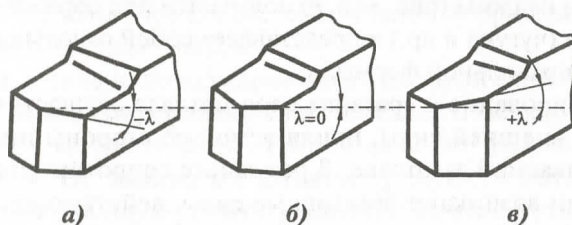


Рис. 33.7. Угол наклона главного режущего лезвия

Если вершина резца является высшей точкой главного режущего лезвия, то угол λ отрицателен и стружка сходит в направлении подачи. Если главное режущее лезвие параллельно основной плоскости, то $\lambda = 0$ и стружка сходит по оси резца. Если вершина резца является нижней точкой главного режущего лезвия, то угол λ положителен и стружка сходит в направлении, обратном направлению подачи.

С увеличением угла λ качество обработанной поверхности ухудшается, осевая составляющая силы резания уменьшается, а радиальная и вертикальная составляющие увеличиваются.

Углы γ , α , ϕ и ϕ_1 могут изменяться вследствие погрешности установки резца в резцедержателе станка.

Виды стружек и силы резания. При резании металлов образуется стружка.

Сливная стружка (рис. 33.8, а) образуется в случаях пластичных материалов при назначении малых глубин и больших скоростей ре-

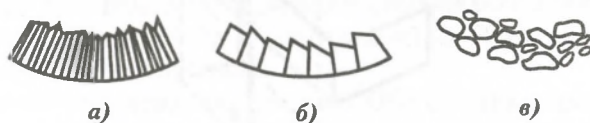


Рис. 33.8. Виды стружек при обработке резанием:

а — сливная; б — скалывания; в — надлома

зания, а также больших подач и передних углов резца. С внутренней прирезцовой стороны стружка гладкая, блестящая, представляет собой сплошную ленту; с наружной стороны она имеет пилообразные зазубрины.

Стружка скалывания (рис. 33.8, б) формируется в случаях обработки материалов средней твердости и твердых при больших глубинах и малых скоростях резания, больших подачах и малых передних углах резца. Внутренняя сторона стружки — гладкая лента, внешняя — ярко выраженные зазубрины.

Стружка надлома (рис. 33.8, в) получается при обработке хрупких материалов (чугуна и др.) и представляет собой отдельные частицы металла неправильной формы.

Деформирование и срезание слоя металла осуществляется под действием внешней силы, прилагаемой со стороны инструмента к обрабатываемой заготовке. В результате сопротивления металла деформации возникают реактивные силы, действующие на резец. Эту систему сил приводят к равнодействующей силе резания R (рис. 33.9), которую затем раскладывают на составляющие, используемые для расчетов процесса резания.

Окружная (тангенциальная, или касательная) составляющая силы резания действует в плоскости резания в направлении главного движения резания.

Радиальная составляющая силы резания F_y действует в плоскости XOY перпендикулярно оси заготовки.

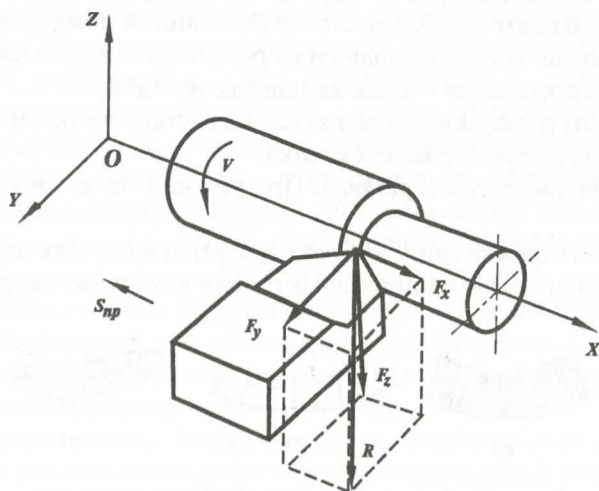


Рис. 33.9. Схема сил резания

Осевая составляющая силы резания F_x действует в плоскости XOY вдоль оси заготовки.

Составляющие силы резания определяют расчетным путем по эмпирическим формулам. На станках замеры сил резания проводят с помощью динамометров.

Физические явления в процессе резания. Обработка резанием характеризуется физическими явлениями, из которых важнейшими являются образование нароста на резце; упрочнение обработанной поверхности; возникновение остаточных напряжений и вибраций элементов технологической системы «станок — приспособление — инструмент — деталь»; нагрев.

Нарост — сильно деформированный плотный слой обрабатываемого материала, закрепившийся на передней поверхности инструмента в виде твердого клина. Нарост изменяет условия стружкообразования. Он выполняет функции режущего материала, что предохраняет режущую кромку, уменьшает износ и повышает работоспособность резца. Вместе с тем налипание частиц нароста хаотично, поэтому чистота обработанной поверхности хуже, чем при обработке заточенным инструментом.

При резании наблюдается упругопластическое деформирование тонкого слоя металла, приводящее к его упрочнению.

Деформирование металла приводит также к образованию в поверхностном слое остаточных растягивающих или сжимающих напряжений. Растягивающие остаточные напряжения снижают предел выносливости, так как приводят к зарождению микротрещин в поверхностном слое заготовки, а сжимающие напряжения повышают его.

При резании иногда возникают вибрации (колебания). Причинами возникновения вынужденных колебаний являются прерывистость процесса резания, неуравновешенность вращающихся масс, погрешность изготовления и сборки передач привода станка и др. Вибрации системы снижают стойкость режущих инструментов. Борьба с ними заключается в увеличении жесткости системы, уменьшении массы заготовок, применении специальных виброгасителей.

Резание металлов сопровождается образованием теплоты. Она отводится стружкой (25–85%), заготовкой (10–50%), инструментом (2–8%), путем лучеиспускания.

Смазочно-охлаждающие среды (СОС) снижают трение по передней и задней поверхностям инструмента, что повышает его стойкость, препятствует образованию наростов (это снижает шероховатость поверхности, уменьшает температуру резания, одновременно

повышается точность обработки). В качестве СОС используют жидкости, газы и газообразные вещества, твердые вещества.

Трение при механической обработке приводит к изнашиванию инструмента. Различают абразивное, окислительное, адгезионное и термическое изнашивание.

33.2. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Инструментальные материалы должны иметь высокую твердость, остающуюся достаточной и при высокой температуре, чтобы осуществлять внедрение инструмента в менее твердый конструкционный материал. Твердость должна сохраняться и при высоких температурах, то есть инструментальные материалы должны обладать высокой красностойкостью. Исходя из особенностей нагружения инструментов (консольное закрепление, ударные нагрузки, изгиб, растяжение, сжатие), их основными прочностными показателями считают пределы прочности на кручение, изгиб и сжатие, а также ударную вязкость. Необходимость противостоять интенсивному истиранию ставит задачу создания износостойких инструментальных материалов. Кроме того, они должны быть технологичными и иметь невысокую стоимость.

Углеродистые инструментальные стали марок У7А, У8А, У10А и другие используют для изготовления инструментов с твердостью HRC = 60–62 после термообработки; красностойкость сталей — до 200–250 °С, допустимые скорости резания — 15–18 м/мин. Применяются в производстве напильников, зубил, метчиков, плашек, ножовочных полотен и других инструментов.

Красностойкость легированных инструментальных сталей достигает 250–300 °С, допустимые скорости резания — 15–25 м/мин. Эти стали незначительно деформируются при термической обработке, поэтому из них изготавливают сложные по конфигурации инструменты: плашки, зубила, метчики, развертки, сверла, резцы, фрезы, протяжки и др.

Из *быстрорежущих сталей* изготавливают режущий инструмент с твердостью HRC = 62–65. После термообработки красностойкость таких сталей сохраняется до 640 °С, скорость резания — до 80 м/мин. Из стали Р9 изготавливают инструменты простой формы (резцы, фрезы, зенкеры и др.), из стали Р18 — сложные инструменты с высокой износостойкостью (метчики, плашки, зуборезный инструмент). Широко распространена быстрорежущая сталь марки Р6М5. Имеются быстрорежущие стали с малым содержанием воль-

фрама (11АРМЗФ2) или без него (11М5Ф). Все шире применяют инструменты из быстрорежущих сталей с износостойкими покрытиями. Так, тонкие покрытия нитрида титана увеличивают срок службы инструмента в 2–5 раз.

Твердые сплавы, обладающие высокой износостойкостью, твердостью ($HRA = 86–92$) и красностойкостью ($800–1000\text{ }^{\circ}\text{C}$), пригодны для скоростей обработки до 800 м/мин. Однокарбидные твердые сплавы марок ВК2, ВК4, ВК6, ВК8 имеют хорошее сопротивление ударным нагрузкам, используются для обработки чугунов, цветных металлов и их сплавов, неметаллических материалов. Двухкарбидные твердые сплавы марок Т5К10, Т14К18, Т15К6, Т30К4 менее прочны, но более износостойки, чем сплавы первой группы. Находят применение при обработке пластичных и вязких металлов и сплавов, углеродистых и легированных сталей. Трехкарбидный твердый сплав марки ТТ7К12 обладает повышенной прочностью, износостойкостью и вязкостью, его применяют для обработки жаропрочных сталей, титановых сплавов и других труднообрабатываемых материалов.

С целью повышения износостойкости без снижения прочности твердых сплавов используют особо мелкие зерна карбида вольфрама (ВК6-ОМ). Инструменты оснащают также пластинками с тонкими покрытиями (толщиной 5–10 мкм) из износостойких материалов (карбида, нитрида или карбонитрида титана и др.). Это повышает их стойкость в 5–6 раз. Есть и безвольфрамовые твердые сплавы марок ТМ1, ТМ3, ТН-20, КНТ-16, создаваемые на основе карбидов или других соединений титана с добавками молибдена, никеля и других тугоплавких металлов.

Минералокерамика — синтетический материал, основой которого служит глинозем (Al_2O_3), спеченный при температуре $1720–1750\text{ }^{\circ}\text{C}$. Минералокерамика марки ЦМ-332 характеризуется красностойкостью $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Инструменты, приготовленные из этого материала, имеют высокую износостойкость и размерную стабильность, характеризуются отсутствием налипания металла на инструмент; их недостаток — низкая прочность и хрупкость. Пластинки из минералокерамики крепят механическим путем или пайкой, предварительно подвергнув их металлизации. С целью улучшения эксплуатационных свойств в минералокерамику добавляют вольфрам, молибден, титан, никель и др. Такие материалы называются *керметами*. Пластинки из минералокерамики применяют для безударной обработки заготовок из сталей и цветных сплавов.

Находят применение в инструментах и сверхтвердые материалы (СТМ). К ним относятся материалы на основе кубического нитрида

бора, композиты. Режущими пластинками из композитов снабжаются резцы и фрезы.

Абразивные материалы представляют собой порошковые мелкозернистые вещества, используемые для производства абразивных инструментов: шлифовальных кругов, лент, брусков, сегментов, головок. Естественные абразивные материалы (наждак, кварцевый песок, корунд) характеризуются значительным разбросом свойств, поэтому применяются редко.

Абразивные инструменты в машиностроении изготавливают из искусственных материалов: электрокорундов, карбидов кремния, карбидов бора, оксида хрома и ряда новых материалов. Все они отличаются высокими свойствами: красностойкостью (1800–2000 °С), износостойкостью и твердостью. Так, микротвердость карбидов бора составляет 43% от микротвердости алмаза, карбидов кремния — 35% и электрокорунда — 25%. Обработку абразивными инструментами ведут на скоростях 15–100 м/с на завершающих этапах технологических процессов по изготовлению деталей машин.

Шлифовальные и полировальные пасты содержат в своем составе оксид хрома. Из новых материалов в качестве абразивов для обработки твердых сплавов используют эльбор, представляющий собой поликристаллические образования на основе нитрида бора кубического или гексагонального строения.

В промышленности широкое распространение получили различные алмазные инструменты. Используют естественные (А) и синтетические (АС) алмазы, отличающиеся высокими твердостью, красностойкостью, износостойкостью и размерной стойкостью. Обработка алмазными инструментами характеризуется высокой точностью, малой шероховатостью поверхности и повышенной производительностью.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие движения осуществляются рабочими органами станка? Какое из них называют движением резания?
2. Какова геометрия токарного проходного резца?
3. Какие физические явления сопровождают процесс резания?

Глава 34

ОБРАБОТКА ЗАГОТОВОК НА ТОКАРНЫХ СТАНКАХ. ТИПЫ СТАНКОВ ТОКАРНОЙ ГРУППЫ

34.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТОКАРНЫХ СТАНКАХ

Обработка на станках токарной группы заготовок, имеющих форму тел вращения, получила широкое распространение. При точении (обтачивании) совершается два движения резания: вращательное движение заготовки (главное движение) и поступательное движение режущего инструмента — резца (движение подачи).

На станках токарной группы помимо обтачивания наружных цилиндрических, конических и фасонных поверхностей выполняют следующие операции: растачивание цилиндрических и конических отверстий, подрезание торцовых поверхностей, нарезание наружной и внутренней резьбы, разрезание, обкатывание роликами и шарами, алмазное выглаживание. Кроме того, на этих станках можно сверлить, зенкеровать, развертывать отверстия, а при установке специальных механизмов — проводить и другие виды обработки.

На токарных станках производят обдирочную, черновую, получистовую и чистовую обработки, а также тонкую обработку различными резцами.

На рис. 34.1 показан общий вид токарно-винторезного станка. Левая 1 и правая 14 тумбы поддерживают станину 2 с призматическими направляющими. На станине монтируют узлы станка, в левой тумбе устанавливают электродвигатель главного движения, в правой — насосную станцию и бак для подачи и хранения смазочно-охлаждающей жидкости. Слева устанавливают переднюю бабку 6 с панелью управления 5. Передачи и механизмы передней бабки позволяют изменять в широком диапазоне частоту вращения шпинделя, в данном случае — с закрепленным на нем патроном. Ниже передней бабки на лицевой стороне станины крепят коробку подач 3. Передачи и механизмы коробки подач служат для изменения скоростей перемещения суппорта (подач). Она дает возможность также переналаживать станок для нарезания резьбы с помощью коробки сменных зубчатых колес 4. Справа на станине располагают заднюю бабку 11, назначение которой (помимо поддержки заготовки во время обработки задним центром) — закрепление осевого инструмента.

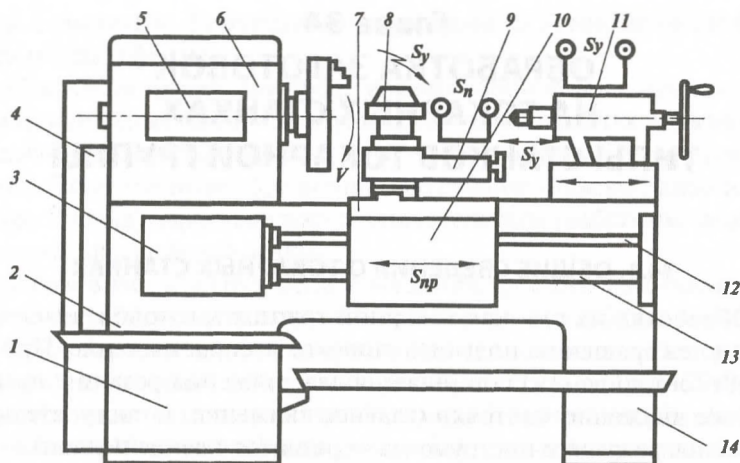


Рис. 34.1. Общий вид токарно-винторезного станка

По направляющим станины между передней и задней бабками перемещается с продольной подачей $S_{пр}$ суппорт 7. На суппорте имеется средняя поперечная каретка, с помощью которой перпендикулярно оси вращения заготовки производится поперечная подача $S_{п}$. Верхний поворотный суппорт 9 устанавливают под любым углом к оси заготовки при обработке конических поверхностей. На верхнем суппорте смонтирован четырехпозиционный поворотный резцедержатель (резцовая головка) 8. На продольном суппорте закреплен фартук 10, передачи и механизмы которого преобразуют вращательное движение ходового винта 12 или ходового валика 13 в поступательное движение суппорта. На станке устанавливают экран (на схеме не показан) для защиты работающего от стружки.

По способу совершения рабочих циклов станки подразделяют на универсальные, полуавтоматические и автоматические.

На универсальном станке рабочий-оператор составляет порядок обработки и изготавливает деталь. Программой обработки для него является технологический процесс. Ручное управление станком позволяет корректировать непосредственно программу.

Станок, работающий в автоматическом режиме, оснащен системой управления, которая заставляет его выполнять определенную программу без вмешательства человека. Автомат нуждается лишь в контроле и наладке. Полуавтоматом называют машину, работающую с автоматическим циклом, для повторения которого требуется вмешательство рабочего. Неавтоматизированными операциями являются, как правило, загрузка и съём обработанных изделий.

Одним из определяющих признаков классификации современных автоматов и полуавтоматов считается тип системы управления. Существуют станки с механической системой управления, когда в качестве программносителя выступает распределительный вал с кулачками, число которых соответствует числу управляемых механизмов.

Вместо кулачков программносителями являются копиры, профиль которых полностью соответствует профилю обрабатываемых деталей. Многие автоматы и полуавтоматы используют систему управления по упорам. При этом передача и преобразование сигналов от упоров осуществляются либо электрической схемой управления станком, либо с помощью ЭВМ. В последнем случае упоры выполняют функции путевых датчиков.

Следующая категория автоматов и полуавтоматов — станки с электро-, гидро- или фотокопировальными устройствами.

Более прогрессивными являются системы управления, в которых программа работы автомата или полуавтомата задается как система чисел.

Представленный на рис. 34.1 токарно-винторезный станок является универсальным и наиболее приемлемым для единичного и мелкосерийного производств.

На токарно-револьверном станке (рис. 34.2, *а*) в револьверной головке (револьверном суппорте) 2 устанавливают различные инструменты. Различают станки с вертикальной, горизонтальной или наклонной осью вращения револьверной головки. На станках с многогранной головкой, вращающейся относительно вертикальной оси, имеются один или два поперечных суппорта 1, что расширяет возможности многоинструментальной обработки.

Быстрая смена инструмента в процессе обработки, предварительная наладка станка, приводящая к возможности обработки по упорам 3, и одновременная обработка несколькими инструментами делают токарно-револьверные станки более производительными и пригодными для серийного производства. Производят на этих станках детали типа штуцеров, ступенчатых валов, фланцев, колец, втулок и др.

Крупные и тяжелые заготовки обрабатываются на токарно-карусельных станках (рис. 34.2, *б*), одно- или двухстоечных (2, 4). Станок имеет круглый стол 1 диаметром до 21 м с вертикальной осью вращения. Инструменты закрепляют в резцедержателях верхнего 3 и бокового 7 суппортов, а также в револьверной головке 6. В одностоечных станках устраивают вертикальный револьверный и боковой

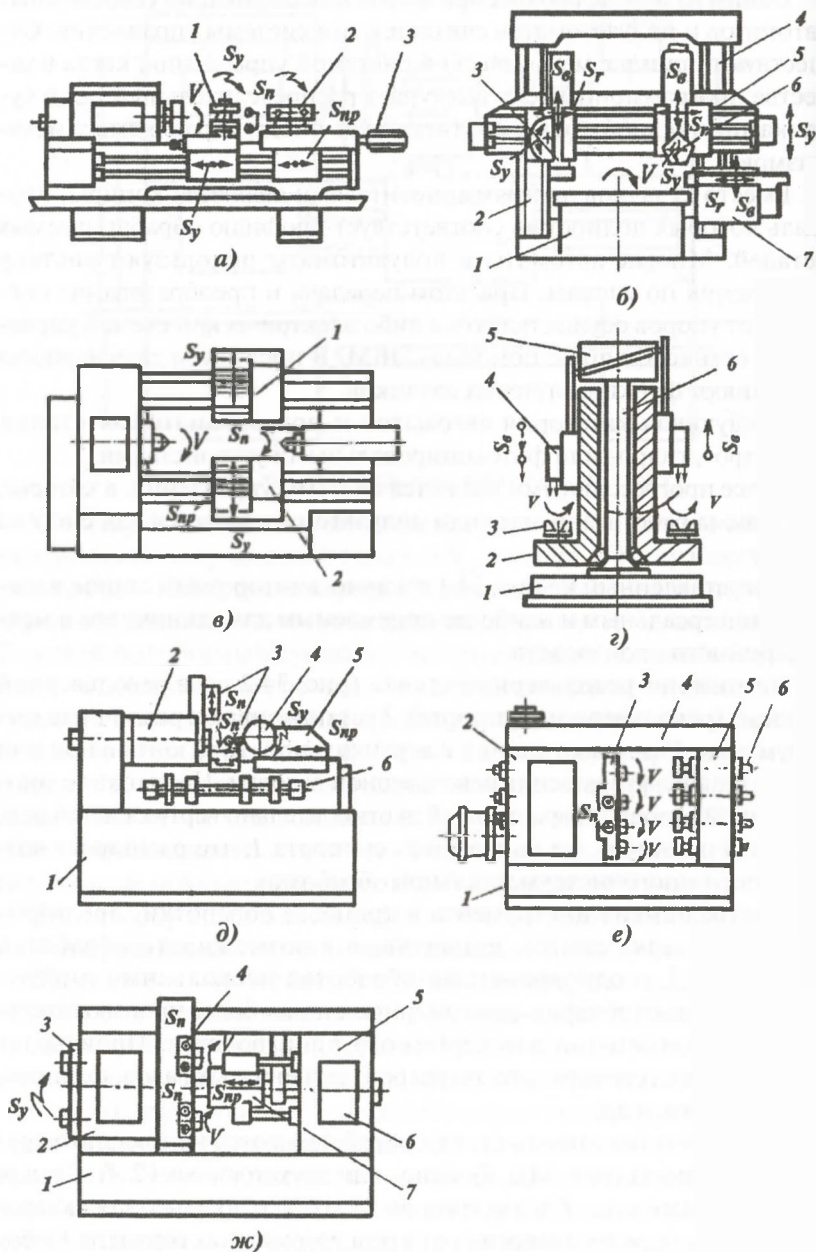


Рис. 34.2. Общий вид станков токарной группы

суппорты. Револьверную головку и верхний суппорт устанавливают на движущейся вверх-вниз траверсе 5.

Одновременная обработка несколькими инструментами повышает производительность станка. На токарно-карусельных станках обрабатывают заготовки рабочих колес турбин, массивных зубчатых колес, маховиков, корпусов и т.д. в единичном и серийном производствах.

Обработку заготовок ведут и на многорезцовых токарных полуавтоматах (рис. 34.2, в), снабженных двумя суппортами: верхним 1, имеющим только поперечную подачу, и нижним 2, имеющим только продольную подачу. Одновременно закрепляют большое количество инструментов. Обрабатывают на станках только наружные поверхности у заготовок деталей типа блоков зубчатых колес, шпинделей, ступенчатых валов и др.

На вертикальных многошпиндельных полуавтоматах роторной обработки (рис. 34.2, г) проводят многоплановую обработку. На станине устанавливают круглый стол 2 с вращающимися шпинделями 3, в которых одновременно обрабатывают несколько заготовок (по числу шпинделей). На центральной колонне, сделанной заодно со столом, закреплены суппорты 4, совершающие вертикальные движения подачи.

Стол и подвижная колонна (общая карусель) вращаются вокруг неподвижной колонны 6, на верхнем конце которой закреплен кулачок 5 подачи суппортных групп. Обработку ведут инструменты вертикальных суппортов, за один оборот карусели и колонны обработка заканчивается. Обрабатывают на станках заготовки деталей типа зубчатых колес, корпусов, дисков турбин и др.

Заготовки деталей разных наименований, но небольших размеров (диаметром до 36 мм) обрабатывают на одношпиндельных токарно-револьверных автоматах (рис. 34.2, д). Шпиндельная бабка 2 автомата снабжена цанговым патроном, зажимным и подающим прутки механизмами. На станине 1 и шпиндельной бабке установлены поперечные суппорты 3, имеющие только поперечные подачи. Также на станине закреплен еще один суппорт 5 продольной подачи с револьверной головкой 4. Всеми движениями (рабочими, установочными и вспомогательными) в автомате управляет кулачковый распределительный вал 6. Таким образом, на станках подобного типа весь цикл обработки совершается автоматически. Это дает высокую производительность труда. Автоматы применяют для обработки больших партий деталей.

Многошпиндельные автоматы параллельной обработки (рис. 34.2, е) широко распространены в массовом производстве. Эти

автоматы обладают жесткой конструкцией, что делает возможной многоинструментальную обработку.

Станина 1 станка несет на себе переднюю 2 и заднюю 5 стойки, соединенные сверху поперечиной 4. На торце передней стойки установлены передний и задний поперечные суппорты 3. В задней стойке установлены упоры 6. Заготовки перед обработкой пропускают через полые шпиндели; в данном случае одновременно обрабатывают наружные поверхности четырех заготовок одинаковых деталей.

Последовательную обработку заготовок проводят на многошпиндельных автоматах, один из которых показан на рис. 34.2, *ж*. На станине 1 установлены передняя 2 и задняя 5 стойки; в передней стойке смонтирован шпиндельный блок 3, а в задней — коробка скоростей 6. Обработку ведут инструментами, закрепленными в поперечных суппортах 4, которые установлены против каждого шпинделя, и в зажимных устройствах кареток осевого суппорта 7. Каретки установлены на одной оси со шпинделями, против которых они располагаются. Поворот шпиндельного блока влечет за собой подачу заготовки на следующую позицию, где продолжается ее обработка новым набором инструментов. Предпоследняя позиция является позицией окончательной обработки и отрезки готовой детали от прутка. На следующей позиции пруток подается до упора, и далее совершается новый цикл обработки.

34.2. ВИДЫ ТОКАРНЫХ РЕЗЦОВ

Выше отмечалось, что обработка на станках токарной группы ведется преимущественно резцами, режущая часть которых оснащена пластинками из твердых сплавов, в частности многогранными непереатачиваемыми пластинками (рис. 34.3, *л*).

По технологическому признаку отличают следующие разновидности резцов. Проходные резцы (рис. 34.3, *а*) используют для обтачивания наружных цилиндрических и конических поверхностей; резцу задается продольное движение подачи. Подрезные резцы (рис. 34.3, *б*) предназначены для обтачивания плоских торцевых поверхностей; резцы имеют поперечную подачу. Обработку поверхностей сложной конфигурации проводят фасонными резцами (рис. 34.3, *в*), с поперечными либо продольными подачами. Прорезные резцы (рис. 34.3, *г*) служат для протачивания канавок. Длина главной режущей кромки резца может быть равной ширине канавки; резцу сообщается поперечная подача. Резьбовыми резцами (рис. 34.3, *д*) проводят нарезание резьбы на наружных и внутренних

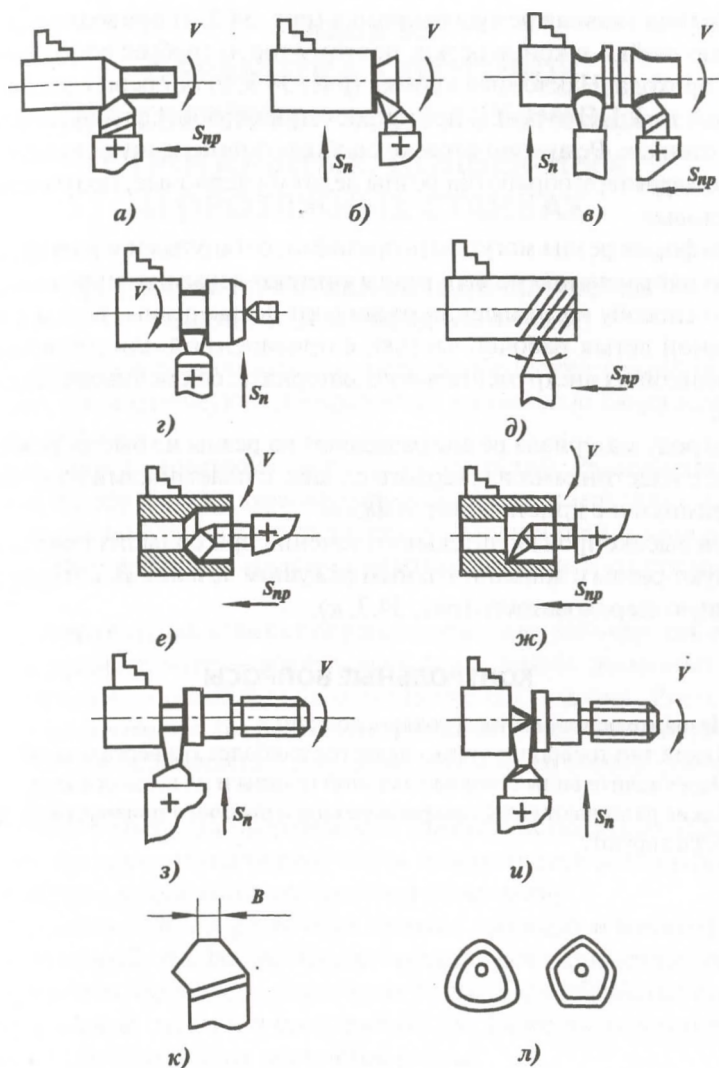


Рис. 34.3. Токарные резцы

поверхностях при продольной подаче. Расточными резцами осуществляют обработку внутренних поверхностей. Расточку ведут проходными резцами сквозных (рис. 34.3, е) и упорными резцами глухих (рис. 34.3, ж) отверстий при продольной подаче. Отрезные резцы служат для разделения заготовок на части и отделения готовой детали от заготовки-прутка.

Прямая главная режущая кромка (рис. 34.3, з) приводит к разрушению шейки в конце резки, поэтому торец требует дополнительного прохода. Наклонная кромка (рис. 34.3, и) оставляет после себя чистый торец. Эти резцы применяют при обработке на автоматических станках. Резцу при отрезке сообщают поперечную подачу.

По характеру обработки резцы делят на черновые, получистовые и чистовые.

По форме резцы могут быть прямыми, оттянутыми и изогнутыми.

По направлению подачи резцы считают левыми или правыми.

По способу изготовления различают целые резцы; резцы с приваренной встык рабочей частью; с приваренной или припаянной пластинкой из инструментального материала; со сменными пластинками.

По роду материала резцы разделяют на резцы из быстрорежущей стали, с пластинками из твердого сплава, с пластинками из минералокерамики и с кристаллами алмазов.

Для высокопроизводительного точения при больших подачах используют резцы с дополнительным режущим лезвием B , которое дает меньшую шероховатость (рис. 34.3, к).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите основные узлы токарного станка.
2. Какой тип токарного станка является наиболее универсальным?
3. Перечислите виды станков токарной группы и их возможности.
4. Какие различают виды токарных резцов и по каким признакам их классифицируют?

Глава 35

ОБРАБОТКА ЗАГОТОВОК НА СВЕРЛИЛЬНЫХ, РАСТОЧНЫХ, СТРОГАЛЬНЫХ, ДОЛБЕЖНЫХ И ПРОТЯЖНЫХ СТАНКАХ

35.1. ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДА ОБРАБОТКИ СВЕРЛЕНИЕМ И РАСТАЧИВАНИЕМ

Сверление и растачивание — методы обработки резанием внутренних цилиндрических поверхностей с помощью сверл или расточных резцов.

Сверлами формируют поверхности отверстий. Расточными резцами ведут обработку в заранее отформованных отверстиях с припуском, чтобы получить отверстия с точно координированными осями. Растачивают средне- и крупногабаритные заготовки корпусных деталей.

На сверлильных станках осуществляют два рабочих движения сверла: вращательное — вокруг своей оси (главное движение) и поступательное — параллельно оси (движение подачи). Расточные станки также имеют два движения: вращение инструмента (главное движение) и перемещение инструментов или заготовки (движение подачи).

Помимо сверл на сверлильных станках используют и другие осевые инструменты для получения поверхностей заданных форм и размеров с высокими показателями по качеству.

На сверлильных и расточных станках проводят и многоинструментную обработку. На расточных станках также применяют осевые инструменты, но чаще — расточные резцы. При обработке используют резцовые головки и резцовые блоки. Более высокую точность обеспечивают алмазные расточные резцы.

35.2. ВИДЫ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА. ЭЛЕМЕНТЫ И ГЕОМЕТРИЯ СПИРАЛЬНОГО СВЕРЛА

Обработку заготовок на сверлильных станках проводят сверлами, зенкерами, развертками, метчиками и комбинированными инструментами.

Сверла по конструктивному признаку разделяют на спиральные, центровочные и специальные. Наибольшее распространение полу-

чили спиральные сверла (рис. 35.1, а); число режущих зубьев (лезвий) $z = 2$. Составными частями сверла являются рабочая часть длиной l_1 , шейка l_2 , хвостовик l_3 и лапка l_4 . Назначение хвостовика — закрепление сверла в шпинделе станка за счет сил трения по конической контактной поверхности. Лапка служит для выбивания сверла из шпинделя, одновременно она предохраняет хвостовик от забоин. Рабочая часть разделена на режущую l_5 и направляющую l_6 части. На рабочей части (рис. 35.1, б) различают пять режущих кромок сверла: главные 1 (две), поперечную 2 (одна) и вспомогательные 3 (две). Основная работа по резанию осуществляется главными режущими кромками. Они образованы пересечением передних 4

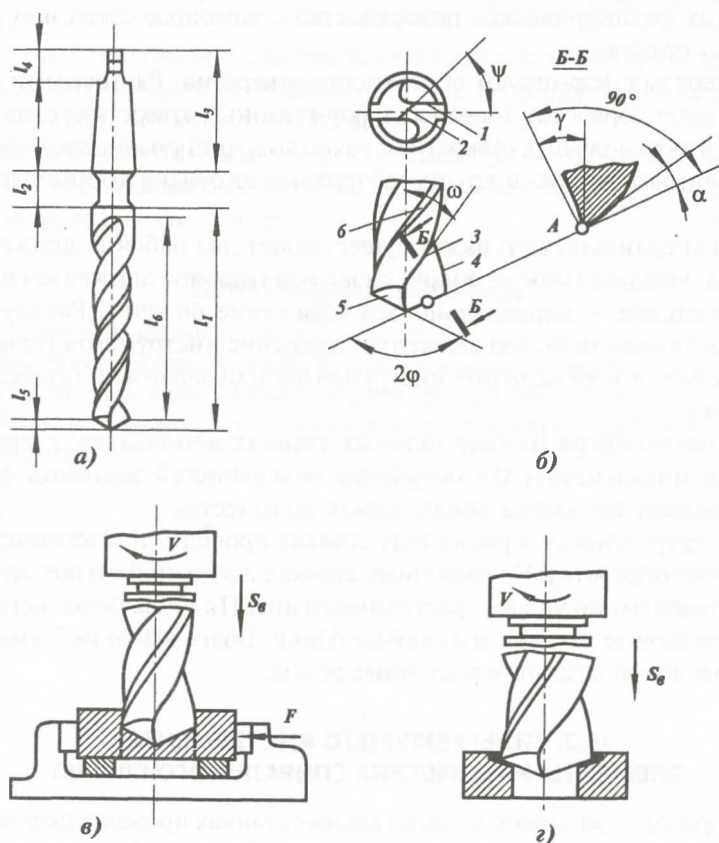


Рис. 35.1. Спиральное сверло:

а — общий вид; б — геометрические параметры сверла; в — сквозное сверление; г — рассверливание

и задних 5 поверхностей рабочей части сверла. Для обеспечения правильного направления и уменьшения влияния трения на работу сверла по его цилиндрической части вдоль винтовых канавок идут две узкие ленточки б.

Сверлами производят сквозное сверление (рис. 35.1, в) по разметке или применяя специальные приспособления — кондукторы, направляющие сверло. Отверстия диаметром более 30 мм рассверливают спиральными сверлами (рис. 35.1, г).

Геометрические параметры сверла: передний угол γ , задний угол α , угол при вершине сверла 2ϕ , угол наклона поперечной режущей кромки ψ и угол наклона винтовой канавки ω (рис. 35.1, б).

Угол γ измеряют в главной секущей плоскости, перпендикулярной главной режущей кромке. Задний угол измеряют в той же плоскости. Угол, образованный пересечением двух главных режущих кромок, считается углом при вершине сверла 2ϕ (изменяется у стандартных сверл от 90 до 118°). Между проекциями главной и поперечной режущих кромок на плоскость, перпендикулярную оси сверла, образуется угол ψ , называемый углом наклона поперечной режущей кромки. Он изменяется у стандартных сверл в диапазоне 50–55°. По наружному диаметру проводят замер угла наклона винтовой канавки ω . Его величина составляет 18–30°. Имеются сверла специальной конструкции (рис. 35.2). Центровочные сверла (рис. 35.2, а) предназначены для формования углублений с торца валов, с помощью этих углублений заготовка устанавливается на центрах станка. Отверстия протяженностью более 3–5 диаметров считаются глубокими, поэтому для их обработки нужны специальные сверла для глубокого сверления: шнековые (рис. 35.2, б), специальные ружейные одностороннего и двустороннего резания (в) и кольцевого сверления (рис. 35.2, г).

Зенкеры (рис. 35.3, а–г) применяют для обработки отформованных отверстий в отливках, поковках или заготовках. Заготовки для этого подвергают предварительной обработке сверлением. По виду обрабатываемых поверхностей зенкеры бывают цилиндрические (а, б), конические (в) и торцевые (г). По конструкции зенкеры различают цельные, насадные и с припаянными твердосплавными пластинками. Зенкеры дают более высокую точность и производительность, чем спиральные сверла. Зенкер отличается от сверла еще и тем, что имеет большое количество режущих лезвий (от 3 до 9) и не имеет поперечной режущей кромки.

Развертки (рис. 35.3, д, е) представляют собой многолезвийный инструмент для окончательной обработки отверстий, они снимают

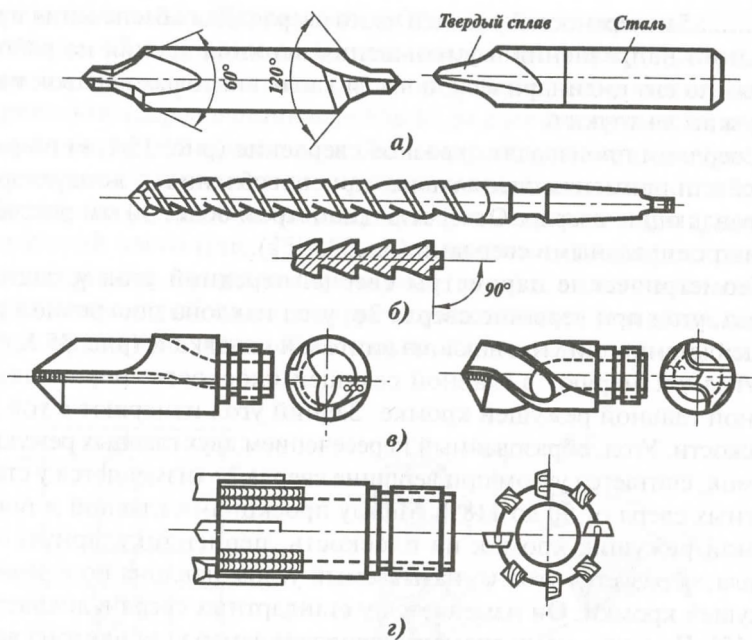


Рис. 35.2. Специальные сверла:

а — центровочное; б — шнековое; в — ружейное; г — кольцевого сверления

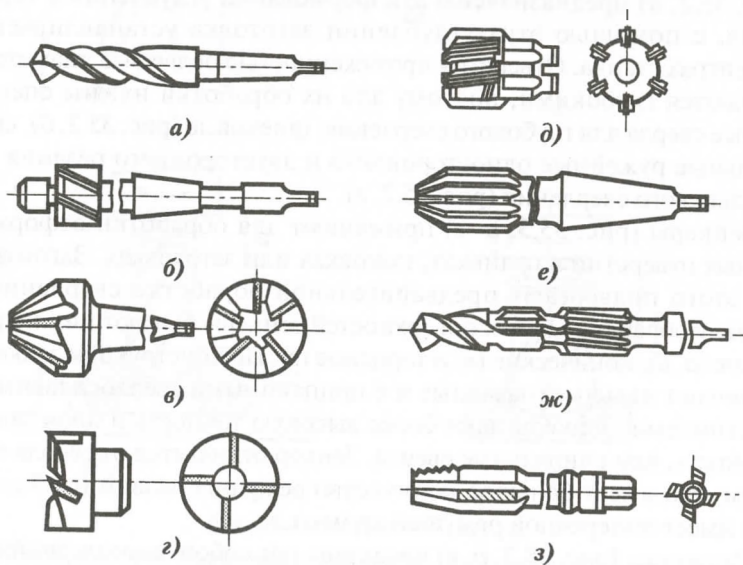


Рис. 35.3. Инструменты для обработки отверстий

малый слой (припуск) металла, поэтому обеспечивают высокую точность. Как и зенкеры, развертки подразделяют по виду обрабатываемых поверхностей на цилиндрические и конические, а по конструкции — на целые, со вставными зубьями, насадные. Развертки имеют еще большее число режущих лезвий (от 5 до 14).

Развертывание проводится, как правило, после зенкерования для получения высокой точности и качества поверхности.

Метчики (рис. 35.3, з) служат для нарезания резьбы в отверстиях. Метчик закрепляют в специальном патроне, чтобы нарезать правильную резьбу и избежать поломки инструмента.

В крупносерийном и массовом производствах широко применяют комбинированные инструменты (рис. 35.3, ж).

Для проведения обработки на расточных станках применяют расточные резцы, сверла, зенкеры, развертки, метчики, фрезы. Чаще всего используют расточные резцы: проходные, подрезные, канавочные и резьбовые, аналогичные рассмотренным ранее.

35.3. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СТРОГАНИЕМ

Методы механической обработки — строгание и долбление — находят применение в условиях единичного и мелкосерийного производства.

При строгании совершается два движения резания: поступательное движение резца или заготовки (главное движение) и прерывистое поступательное движение подачи. Движение подачи направлено перпендикулярно основному движению.

Резец и заготовка в процессе строгания находятся в прерывистом контакте, который происходит только при рабочем ходе, когда снимается слой металла заготовки. Таким образом, резец каждый раз врезается в заготовку с ударом. Чтобы противостоять динамическим нагрузкам и достичь заданной точности обработки, строгальные резцы делают более массивными.

Поперечно-строгальный станок (рис. 35.4, а) состоит из основания 1, станины 2, траверсы 3, которая движется по вертикальным направляющим станины, стола 4, установленного на траверсе консольно. По верхним горизонтальным направляющим станины перемещается ползун 7. Движение ползуну задают либо специальный кулисный механизм, либо гидропривод, размещаемые в станине станка. На торце ползуна смонтирован вертикальный суппорт 6, который может быть выставлен под углом. Резец закрепляют в откидном резцедержателе 5. Движения подачи на станке совершаются во время холостых ходов ползуна.

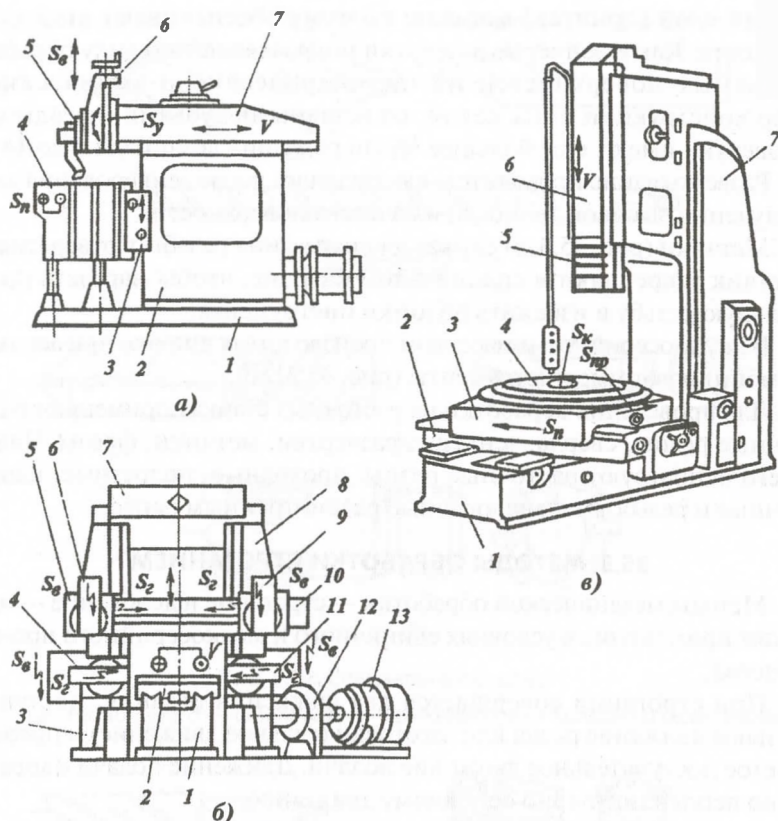


Рис. 35.4. Общие виды строгальных и долбежных станков:

а — поперечно-строгальный; б — продольно-строгальный; в — долбежный

Продольно-строгальные станки (рис. 35.4, б) бывают одно- и двух-стоечные. Станина 1 снабжена продольными направляющими, по которым стол 2 совершает возвратно-поступательные перемещения, которые задаются ему либо электродвигателем 13 через коробку скоростей 12 и реечную или червячную передачи, либо гидrocилиндром. Станок имеет жесткую конструкцию за счет левой 3 и правой 8 стоек, скрепленных наверху поперечиной 7. По вертикальным направляющим стоек передвигается траверса 5, на которой установлены два верхних суппорта 6 и 9.

Суппортам через коробку подач 10 по направляющим траверсы задается горизонтальная (поперечная) подача. Боковые суппорты 4, 11 от индивидуальных коробок подач имеют горизонтальную (попе-

речную) и вертикальную подачи. Все суппорты могут поворачиваться на требуемый угол при строгании наклонных плоскостей.

К специальным относятся *кромкострогальные станки*, предназначенные для подготовки кромок листов и полос под сварку.

Строгальные резцы (рис. 35.5, а) делают изогнутыми назад, чтобы режущие элементы воспринимали ударные нагрузки в начале рабочего хода. Расположение вершины на нейтральной линии (на расстоянии $H/2$) уменьшает также изгиб и колебания стержня резца. По назначению резцы делят на проходные (рис. 35.5, а), подрезные (рис. 35.5, б), отрезные (рис. 35.5, в) и фасонные. Геометрия резцов: углы — передний γ (12°) и задний α (8°), главный угол в плане ϕ , вспомогательный угол в плане ϕ_1 и угол наклона главной режущей кромки λ . Резцы оснащены пластинками из быстрорежущих сталей марок Р12, Р6М3, Р9М4К8Ф и твердых сплавов марок ВК6, ВК8, Т15К6 и др.

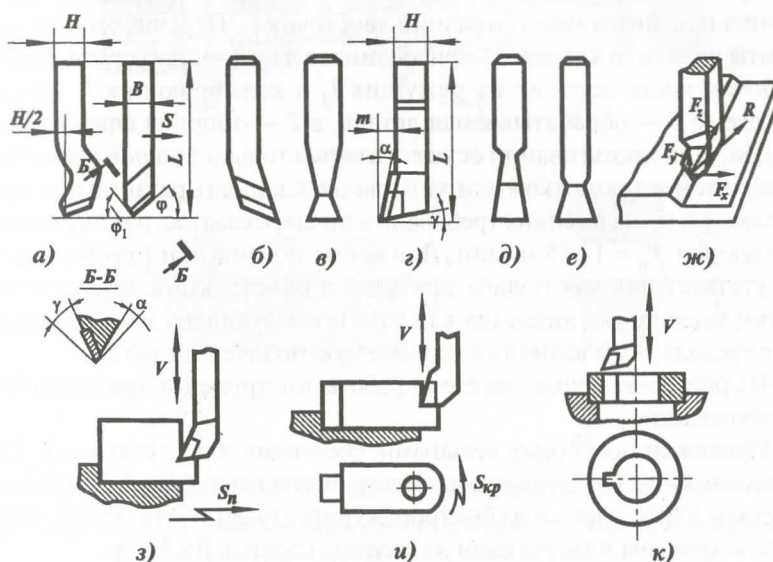


Рис. 35.5. Строгальные и долбежные резцы

Долбежные резцы (рис. 35.5, з) выполняют изогнутыми вперед, так как они работают при вертикальном перемещении и деформируют срезаемый слой металла своей нижней частью, что определяет положение углов, показанное на рисунке. Резцы бывают проходными (рис. 35.5, г), прорезными (рис. 38.5, д) и для шпоночных пазов (рис. 35.5, е).

35.4. ОБРАБОТКА НА ПРОТЯЖНЫХ СТАНКАХ

В условиях крупносерийного и массового производств находит широкое применение высокопроизводительный и точный метод обработки внутренних и внешних поверхностей деталей машин — протягивание.

Обработка совершается на горизонтально- или вертикальнопротяжных станках. Последние по внешнему виду напоминают долбежный станок. Для высокопроизводительной работы существуют станки непрерывного действия (конвейерные и карусельные).

На рис. 35.6 показаны некоторые формы отверстий и наружных поверхностей деталей, получаемые протягиванием, а также схемы работы протяжек. Протяжку для внутреннего протягивания 4 (рис. 35.6, б) с помощью переднего хвостовика длиной l_1 крепят в тяговом патроне 1 протяжного станка. Далее у протяжки предусмотрены шейка l_2 , переходный конус l_3 , передняя направляющая l_4 , задняя направляющая l_7 и задний хвостовик l_8 . Перечисленные элементы являются крепежно-присоединительной частью протяжки. Ее рабочая часть состоит из режущих l_5 и калибрующих l_6 зубьев. На схеме 3 — обрабатываемая деталь, а 2 — опорная сферическая шайба. При протягивании осуществляется только главное движение, совершаемое протяжкой или заготовкой. Скорость резания при протягивании из-за высоких требований по шероховатости поверхности составляет $V_p = 1-15$ м/мин. Движение подачи при протягивании отсутствует, так как подача заложена в конструкцию инструмента путем увеличения диаметра каждого последующего зуба протяжки на определенную величину, называемую подачей на зуб S_z .

На рис. 35.6, в показана схема работы инструмента при наружном протягивании.

Протяжки могут быть цельными, сборными или составными. Изготавливают их из легированных инструментальных сталей (например, из стали ХВГ), а также из быстрорежущих сталей Р6М5, Р9К5; могут быть оснащены пластинками из твердых сплавов ВК8 и др.

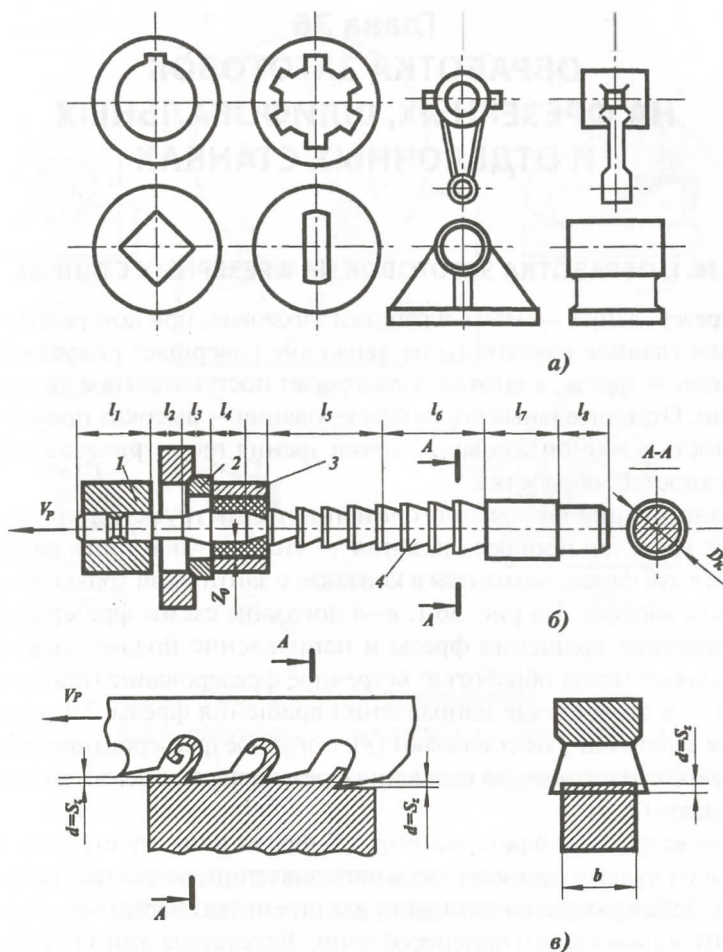


Рис. 35.6. Обработка на протяжных станках:

а — поверхности, обрабатываемые протягиванием; *б* — внутреннее протягивание; *в* — наружное протягивание

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каково назначение сверлильных, расточных, долбежных и протяжных операций?
2. Какова геометрия спирального сверла?
3. Каково назначение зенкеров, разверток, метчиков?
4. Назовите основные узлы строгальных и долбежных станков.
5. Какие специфические наружные и внутренние поверхности получают обработкой на протяжных станках?

Глава 36

ОБРАБОТКА ЗАГОТОВОК НА ФРЕЗЕРНЫХ, ШЛИФОВАЛЬНЫХ И ОТДЕЛОЧНЫХ СТАНКАХ

36.1. ОБРАБОТКА ЗАГОТОВОК НА ФРЕЗЕРНЫХ СТАНКАХ

Фрезерование — метод обработки заготовок, при котором непрерывное вращательное движение совершает режущий инструмент — фреза, а заготовка совершает поступательное движение подачи. Отличительные черты фрезерования — высокая производительность и разноплановая, с точки зрения геометрических форм поверхностей, обработка.

Конструкция фрезы многолезвийного инструмента предопределяет характер процесса резания — это прерывистость резания: каждый зуб фрезы находится в контакте с заготовкой только какую-то часть оборота. На рис. 36.1, *a–д* показаны схемы фрезерования. Направление вращения фрезы и направление подачи заготовки определяют метод обработки: встречное фрезерование (против подачи) — в этом случае направления вращения фрезы 2 и перемещения заготовки 1 не совпадают (*в*); попутное фрезерование (по подаче), когда направления вращения фрезы и перемещения заготовки совпадают (*a, д*).

При встречном фрезеровании зуб фрезы снимает стружку толщиной от нулевого до максимального значений, возрастает нагрузка на зуб. Действующая на заготовку сила стремится оторвать ее от стола, вырвать из зажимного приспособления. Вследствие этого в технологической системе возникают вибрации, отрицательно сказывающиеся на обработке. Возможное скольжение зуба по поверхности металла, упрочненного предыдущим зубом, приводит к повышенному износу фрезы. Попутное фрезерование более благоприятно. Зуб фрезы сначала снимает слой металла наибольшей толщины, таким образом нагрузка на зуб изменяется от максимального до нулевого значений. Возникающая сила прижимает заготовку к столу, вибрации минимальны, проскальзывания зубьев нет, что приводит к уменьшению шероховатости поверхности и износа инструмента, несмотря на то что он начинает обработку с загрязненной корки заготовки.

Торцевое фрезерование (рис. 36.1, *б*) еще более благоприятно, так как торцевая фреза лучше закреплена в шпинделе станка и обеспе-

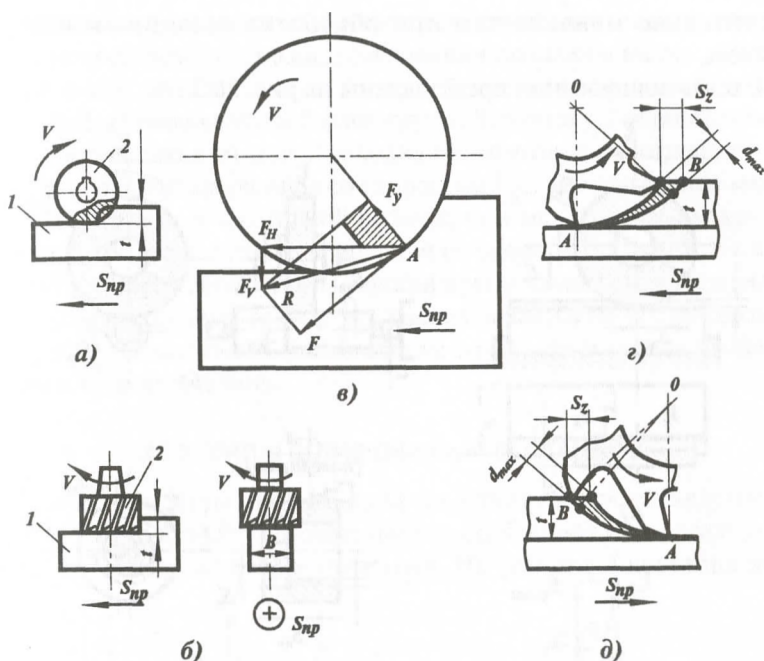


Рис. 36.1. Схемы фрезерования:

а, д — попутное; б — торцевое; в, з — встречное

чивает более плавную работу за счет введения в действие большого числа зубьев.

36.2. ОБРАБОТКА ЗАГОТОВОК НА ШЛИФОВАЛЬНЫХ И ОТДЕЛОЧНЫХ СТАНКАХ

Шлифование — распространенный вид чистовой и тонкой обработки деталей машин. Часто шлифование является окончательной обработкой. Процесс резания материала заготовки абразивными зернами — это сущность шлифования. Абразивные зерна с помощью различных связующих веществ образуют шлифовальные круги — инструменты для обработки шлифованием, работающие на больших скоростях ($V_k > 15$ м/с). Вращение шлифовального круга является главным движением резания.

Абразивные зерна осуществляют силовое воздействие на заготовку, что приводит к поверхностному пластическому деформированию материала. Поверхностный слой упрочняется, но эффект упрочнения из-за высоких температур (процесс рекристаллизации)

значительно меньше, чем при обработке лезвийным инструментом.

Схемы шлифования представлены на рис. 36.2.

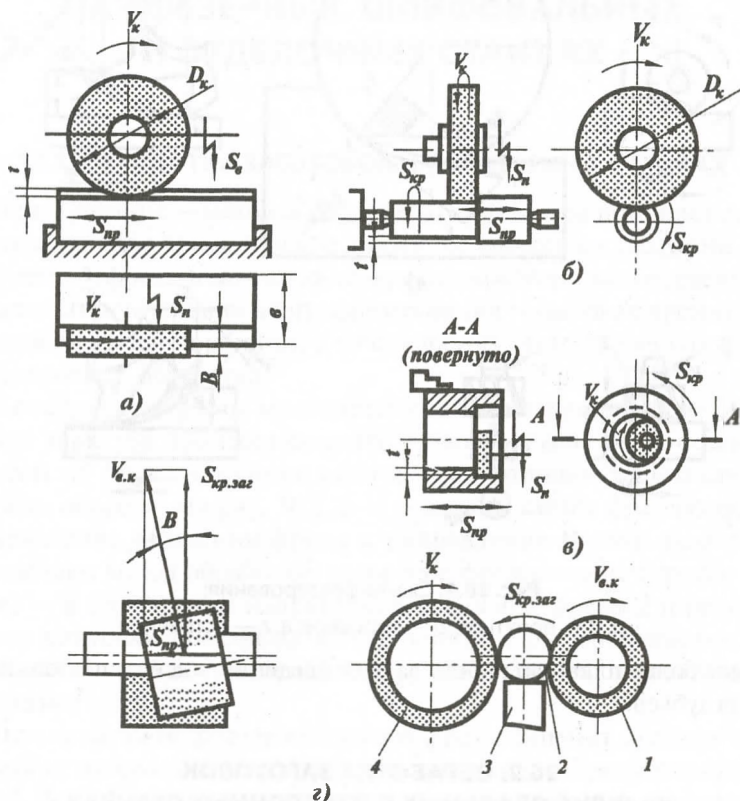


Рис. 36.2. Основные схемы шлифования:

а — плоское; б — круглое; в — внутреннее; г — бесцентровое

Возвратно-поступательное перемещение заготовки при плоском шлифовании (рис. 36.2, а) является продольной подачей (м/мин). Круг или заготовка должны совершать поперечную прерывистую подачу (мм/дв.ход). Вертикальная подача (мм) на глубину резания также совершается прерывисто.

Возвратно-поступательное перемещение заготовки (рис. 36.2, б) при круглом шлифовании представляет собой продольную подачу (мм/об); вращение заготовки — круговую подачу (м/мин). Поперечная подача на глубину резания осуществляется при крайних положениях заготовки (мм/дв.ход или мм/ход).

Движения резания при внутреннем шлифовании по аналогии с рассмотренными схемами шлифования показаны на рис. 36.2, в. Главное движение резания V_k при бесцентровом шлифовании (рис. 36.2, г) совершает рабочий круг 4. Заготовку 2 устанавливают на поддерживающий нож 3, справа от заготовки располагают ведущий круг 1, вращающийся со скоростью $V_{в.к}$. Так как трение между ведущим кругом и заготовкой больше, чем между рабочим кругом и заготовкой, то заготовка вращается со скоростью, близкой к скорости $V_{в.к}$. Перед обработкой ведущий круг устанавливают под углом $1-7^\circ$, благодаря чему вектор $V_{в.к}$ раскладывается на составляющие $S_{кр.заг}$ и $S_{пр}$. Продольная подача обеспечивает прошлифовывание заготовки на всю ее длину.

36.3. ТИПЫ ШЛИФОВАЛЬНЫХ СТАНКОВ

Основные типы шлифовальных станков представлены на рис. 36.3, а–в. Круглошлифовальные станки бывают универсальными (рис. 36.3, а), простыми и врезными. На станине 1 круглошлифо-

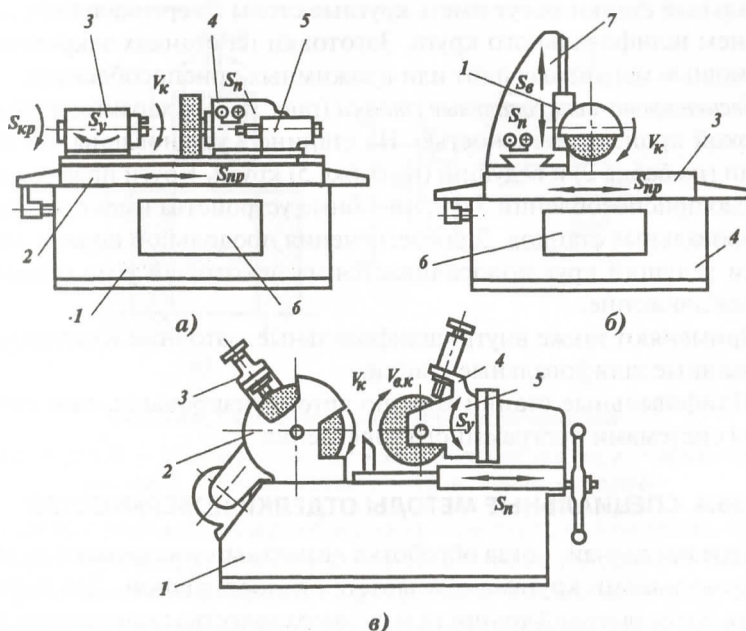


Рис. 36.3. Общие виды шлифовальных станков:

а — круглошлифовальный; б — плоскошлифовальный; в — бесцентрово-шлифовальный

вального станка располагают стол 2, который с помощью гидропривода 6 совершает возвратно-поступательные перемещения относительно шлифовального круга. Передняя 3 и шлифовальная 4 бабки универсального станка могут поворачиваться вокруг вертикальной оси. В передней бабке расположена коробка скоростей, с помощью которой заготовке сообщается круговая подача. Шлифовальная бабка может перемещаться по своим направляющим для обеспечения поперечной подачи, необходимой для установления глубины резания. На столе установлена задняя бабка 5, задний центр которой поддерживает оправку с закрепленной на ней заготовкой. Простые круглошлифовальные станки имеют неповоротные бабки, а врезные характеризуются отсутствием продольной подачи.

Плоскошлифовальный станок (рис. 36.3, б) состоит из станины 4, прямоугольного стола 3, продольная подача которого осуществляется гидроприводом 6. По вертикальным направляющим стойки 7 перемещается шлифовальная бабка 1. Кроме того, сама стойка имеет возможность перемещаться по направляющим станины. Этим обеспечивается поперечная подача шлифовального круга. Плоскошлифовальные станки могут иметь круглые столы с вертикальным вращением шлифовального круга. Заготовки на станках закрепляют с помощью магнитных плит или в зажимных приспособлениях.

Бесцентрово-шлифовальные станки (рис. 36.3, в) характеризуются высокой производительностью. На станине 1 установлены шлифующий (на бабке 2) и ведущий (на бабке 5) круги. Круги правят с помощью приспособлений 3 и 4; подобные устройства имеются у всех шлифовальных станков. Для обеспечения продольной подачи заготовки ведущий круг поворачивается на некоторый угол (установочное движение).

Применяют также внутришлифовальные, заточные и специализированные шлифовальные станки.

Шлифовальные станки хорошо автоматизированы, они оснащены системами программного управления.

36.4. СПЕЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОТДЕЛКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Нередки случаи, когда обработка лезвийным инструментом или шлифовальными кругами оказывается недостаточной. Для достижения более высокой точности и лучшего качества поверхности деталей применяют отделочные методы обработки.

Притиркой поверхностей (рис. 36.4, а) устраняют незначительные отклонения от геометрических форм и размеров (предварительная

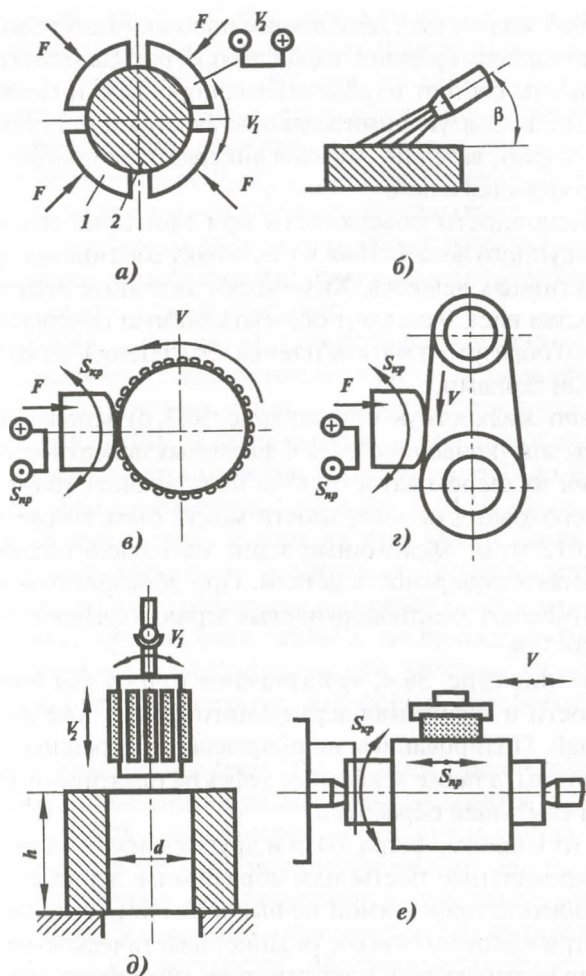


Рис. 36.4. Схемы методов отделки поверхностей:

a — притирка; *б* — абразивно-жидкостная; *в* — полирование; *г* — абразивной лентой; *д* — хонингование; *е* — суперфиниширование

притирка) и уменьшают шероховатость поверхности (окончательная притирка). Притиркой достигают 5-го и 6-го квалитетов точности и шероховатости поверхности $Ra < 0,1$ мкм. Инструментом служат притиры 1 соответствующей геометрической формы, изготавливаемые из более мягких материалов (серого чугуна, бронзы, меди, дерева), чем обрабатываемый материал заготовки 2. На поверхность притира наносят абразивный порошок или притирочную пасту

со связующей жидкостью. Абразивные порошки могут быть из электрокорунда, карбида кремния, карбида бора, оксида хрома и др. Притирочные пасты состоят из абразивных порошков и химически активных веществ. Связующими жидкостями служат машинное масло, керосин, стеарин, вазелин. Абразив внедряется в поверхность притира и удерживается в ней.

Микронеровности поверхности при притирке сглаживаются за счет совокупного воздействия на заготовку абразивных зерен и химически активных веществ. Химически активные вещества, входящие в состав паст, окисляют обрабатываемую поверхность, в результате чего образуется мягкая пленка. Эта пленка легко удаляется абразивными зернами.

Абразивно-жидкостную отделку (рис. 36.3, б) используют для обработки объемно-криволинейных и фасонных поверхностей с целью уменьшения их шероховатости. Она не повышает точность обработки, а шероховатость поверхности может быть снижена до $Ra = 0,032-0,012$ мкм. Абразивные зерна не только обрабатывают, но и упрочняют поверхность детали. При абразивно-жидкостной отделке применяют электрокорундовые зерна, в суспензии их содержится до 30–35%.

Полирование (рис. 36.4, в) назначают только для уменьшения шероховатости и получения зеркального блеска или для декоративных целей. Полированием не исправляют погрешности геометрической формы, а также локальные дефекты (вмятины и др.), оставшиеся от предыдущей обработки.

На круг из войлока, фетра, бязи и других мягких материалов наносят полировальные пасты или абразивные зерна со смазкой. В зоне обработки, проводимой на высоких скоростях (до 40 м/с), протекают три процесса: тонкое резание, пластическое деформирование поверхностного слоя и воздействие химически активных веществ, содержащихся в пасте. Абразивные материалы различны: электрокорунд и оксид железа — для обработки сталей, карбид кремния и оксид железа — для обработки чугуна, оксид хрома и наждак — для обработки сплавов меди и алюминия.

Абразивными лентами шлифуют (рис. 36.4, г) металлические и неметаллические детали с криволинейными поверхностями. Рабочая поверхность ленты намного превышает рабочую поверхность полировального круга. Благодаря этому облегчается отвод теплоты из зоны обработки. Отделяют поверхности абразивной лентой после чистовой обработки, при этом повышается точность и уменьшается шероховатость.

Хонингование (рис. 36.4, д) применяют для изготовления отверстий с высокой точностью и малой шероховатостью. Хонингуют специальными инструментами — хонами — с равномерно раздвигавшимися в радиальном направлении абразивными брусками. Хон совершает вращательное движение и возвратно-поступательное перемещение, соотношение $V_1/V_2 = 1,5-10,0$. Скорость V_1 изменяется от 45 до 75 м/мин в зависимости от обрабатываемого материала. В результате совмещения движений на обрабатываемой поверхности образуется мелкая сетка пересекающихся рисок от абразивных зерен. Эта сетка хорошо удерживает смазку.

Хонингование устраняет конусообразность и овальность отверстий, но не исправляет положение их осей из-за шарнирного соединения хона со шпинделем станка. Достигают точности отверстий 5-го, 6-го квалитетов, а шероховатость поверхности $Ra = 0,8-0,1$ мкм. Обрабатывают отверстия диаметрами от 20 до 400 мм, снимаемый при этом слой металла составляет 0,01–0,20 мм.

Хонингование подразделяют на предварительное, чистовое и тонкое. При хонинговании необходима обильная смазка. Бруски изготавливают из электрокорунда или карбида кремния на керамической связке, лучшие результаты дают бруски на бакелитовой связке. Применяют и алмазные бруски, которые хорошо исправляют погрешности геометрической формы обрабатываемого отверстия.

Суперфиниширование (рис. 36.4, е) после тонкого точения, шлифования или хонингования уменьшает шероховатость поверхности до $Ra = 0,2-0,025$ мкм. Погрешности предыдущих обработок не устраняются. В результате суперфиниширования изменяется форма микровыступов, они округляются, поверхность приобретает сетчатый рельеф. Тем самым создаются благоприятные условия для контакта трущихся поверхностей. Абразивные бруски устанавливают в специальной головке. Брускам задают специальные колебательные движения с амплитудой 1,5–6,0 мм и частотой 400–1200 колебаний в минуту. При этом они поджимаются к обрабатываемой поверхности с малыми усилиями.

Смазка при суперфинишировании играет важную роль. В начале обработки острые микровыступы поверхности прорывают масляную пленку и контактируют с брусками. Давление на выступах велико, что создает условия для их пластического деформирования. Далее масляную пленку прорывает все большее количество выступов, при этом давление снижается; в какой-то момент давление брусков уже не может прорвать масляную пленку, которая закрывает выров-

ненные микровыступы. В момент создания жидкостного трения процесс суперфиниширования прекращается автоматически.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие способы по направлению движения инструмента и заготовки различают при фрезеровании?
2. Назовите основные типы фрезерных станков и виды фрез.
3. Каково назначение шлифования и какие при этом используют схемы?
4. Перечислите основные типы шлифовальных станков.
5. Какими методами обработки поверхностей достигается повышенная точность и чистота?

Глава 37

ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

37.1. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

Электрофизические методы обработки заготовок приобретают все большее значение, так как они пригодны для обработки прочных, хрупких, очень вязких и других материалов.

Электрофизическая обработка называется также электроэрозионной, так как она основана на эрозии (разрушении) электродов из токопроводящих материалов при пропускании между ними импульсного электрического тока. При достижении определенной разности потенциалов на электродах в межэлектродной среде (газовой или — лучше — жидкостной) за счет ионизации образуется канал проводимости, по которому осуществляется импульсный искровой или дуговой разряд. Плотность тока в канале проводимости достигает больших значений — до $8000\text{--}10\,000\text{ А/мм}^2$, а время разряда всего $10^{-15}\text{--}10^{-16}\text{ с}$. При этих условиях на поверхности электрода-заготовки температура возрастает до $10\,000\text{--}12\,000\text{ }^\circ\text{C}$, что приводит к расплавлению и испарению элементарного объема металла. На обрабатываемой поверхности появляется лунка. Так продолжается до тех пор, пока не снимается слой металла и пока между электродами возможен электрический пробой при заданном напряжении импульса. Расстояние между электродами при обработке растет, и наступает момент прекращения обработки. Поэтому для продолжения обработки электроды необходимо сближать. На заготовку действуют электростатические и электродинамические силы, а также давление жидкости вследствие возникающей при импульсных разрядах кавитации.

Электрофизическая обработка имеет четыре разновидности: электроискровая, электроимпульсная, электроконтактная и анодно-механическая.

Электроискровая обработка (рис. 37.1, а) основана на использовании импульсного искрового разряда между заготовкой (анод) и инструментом (катод); длительность разряда $20\text{--}200\text{ мкс}$. Обработка ведется в среде диэлектрической жидкости (керосина или минерального масла), которая охлаждает продукты эрозии, препятствует нагреву электродов, уменьшает боковые разряды между инструментом

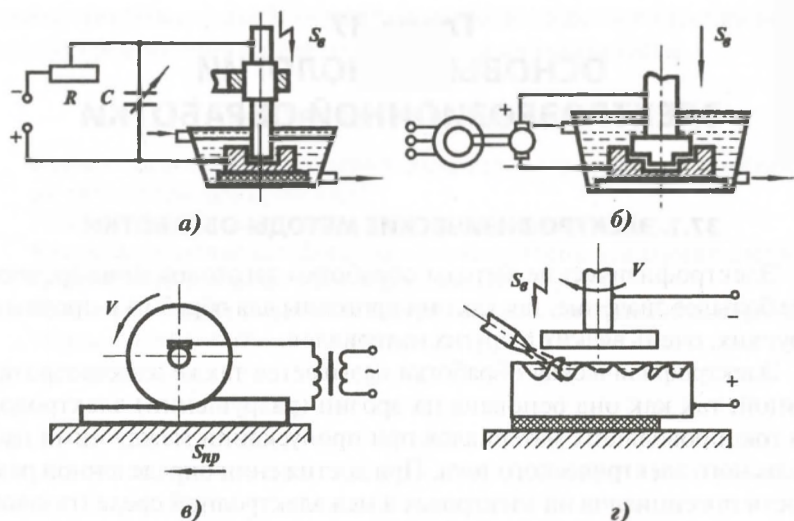


Рис. 37.1. Схемы электрофизической обработки:

a — электроискровая; *б* — электроимпульсная; *в* — электроконтактная; *г* — анодно-механическая

и заготовкой. Для сохранения постоянного зазора станки для электроискровой обработки снабжают следящими системами и механизмом автоматической подачи инструмента.

Источниками электроэнергии служат машинные, электронные, тиристорные, ламповые и транзисторные генераторы импульсов моделей. Electroды-инструменты изготавливаются из латуни, меди, алюминия, медно- или углеграфитовой массы.

Электроискровую обработку широко применяют для прорезки пазов, вырезки по контуру, для изготовления штампов, пресс-форм, фильер, режущих инструментов. Хорошо обрабатываются твердые сплавы, тантал, вольфрам, молибден и др. К недостаткам процесса относят сравнительно низкую производительность обработки, большой износ электродов и образование на деталях дефектного слоя толщиной 0,05–0,5 мм.

Электроимпульсная обработка (рис. 37.1, б) заключается в использовании электрических импульсов большой длительности — от 500 до 10 000 мкс. Происходит мощный дуговой разряд между поверхностями инструмента и заготовки; при этом быстрее разрушается катод. Поэтому при электроимпульсной обработке применяют обратную полярность включения электродов (в отличие от электроискровой обработки): заготовка — катод, а инструмент — анод. При этом ме-

тоде обработки износ инструментов-электродов значительно меньше, чем при электроискровой обработке. Большие мощности импульсов приводят к высокой производительности процесса: съём металла в единицу времени в 8–10 раз больше, чем при электроискровой обработке.

Обработку ведут в жидком диэлектрике; инструмент автоматически подается в направлении обработки, что обеспечивает постоянство зазора.

Рассматриваемый способ часто используют для предварительной обработки фасонных поверхностей штампов, лопаток, инструментов. Применяют его и для обработки твердых, нержавеющей и жаропрочных сплавов.

При *электроконтактной обработке* (рис. 37.1, в) используют локальный нагрев заготовки в месте ее контакта с электродом-инструментом. Источником образования теплоты в зоне обработки служат импульсные дуговые разряды, возникающие в результате быстрого перемещения инструмента относительно заготовки. Соприкосновение под небольшим давлением двух металлических электродов приводит в месте контакта к повышенному электросопротивлению, разогреву, размягчению и плавлению материала заготовки. Затем разогретый или расплавленный металл удаляется из зоны обработки механическим путем за счет движения заготовки относительно инструмента. Рабочий инструмент, обычно в виде диска, не расплавляется из-за быстрого перемещения (скорость вращения диска — 30–80 м/с) или охлаждения.

Электроконтактная обработка не обеспечивает высоких точности и чистоты качества поверхности, но позволяет получить высокую производительность процесса обработки вследствие значительного съёма металла. Применяют ее для резки заготовок, обдирки отливок, заточки инструмента, плоского шлифования, прошивки отверстий, очистки от окаины, обработки криволинейных поверхностей и т.д. Рекомендуются для обработки углеродистых и легированных сталей, чугуна, цветных сплавов, тугоплавких, труднообрабатываемых и специальных сплавов.

Анодно-механическая обработка (рис. 37.1, г) характеризуется протеканием в месте обработки нескольких процессов. Анодом служит заготовка, а катодом — инструмент. В качестве инструмента выступают диски, цилиндры, ленты, проволока. Заготовке и инструменту сообщаются движения, аналогичные движениям при обработке резанием. В зону обработки подают электролит, которым чаще всего является водный раствор жидкого натриевого стекла.

Пропускание постоянного тока через зону обработки приводит к анодному растворению, характерному для электрохимической обработки. В моменты соприкосновения микронеровностей обрабатываемой поверхности заготовки с инструментом возникают электродуговые разряды, приводящие к электроэрозии, характерной для электроискровой обработки. И, наконец, при контакте заготовки с инструментом за счет появления кратковременных дуговых разрядов происходит процесс разогрева металла в локальных зонах, характерных для электроконтактной обработки. Размягченный металл и продукты анодного растворения и электроэрозии удаляют из зоны обработки.

37.2. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

В основу электрохимических методов обработки заготовок положен принцип анодного растворения, имеющий место при электролизе. При подаче постоянного тока в место обработки на поверхности заготовки (аноде) происходят химические реакции, превращая слой металла в химические соединения. Продукты электролиза переходят в раствор или удаляются механическим путем. К методам, получившим наибольшее распространение в промышленности, относят электрохимическое полирование, электрохимическую размерную обработку, электроабразивную и электроалмазную обработки.

Электрохимическое полирование (рис. 37.2, а) проводят в ванне, заполненной электролитом, которым являются растворы кислот или щелочей (в зависимости от материала обрабатываемой заготовки). Катодами при обработке служат металлические пластины. При подаче напряжения начинается процесс избирательного растворения металла поверхности заготовки. Вследствие большей плотности тока

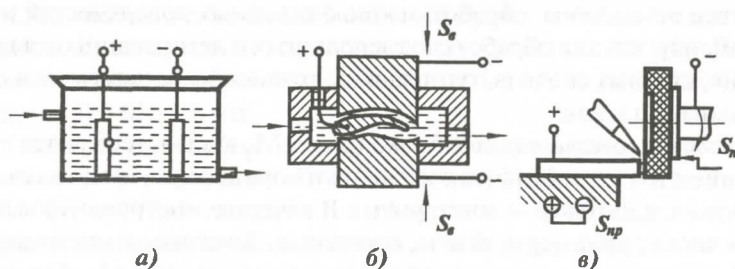


Рис. 37.2. Схемы электрохимической обработки:

а — полирование; б — размерная; в — электроабразивная и электроалмазная

интенсивнее растворяются микровыступы. Так осуществляют сглаживание поверхности.

Электрохимическую размерную обработку проводят с прокачкой электролита под давлением между заготовкой и инструментом. Вновь поступивший свежий электролит способствует лучшему растворению металла поверхности заготовки и удалению продуктов анодного растворения. Прокачка предупреждает также осаждение металла на инструменте, что сохраняет его форму и размеры и таким образом увеличивает время его эксплуатации.

Съём металла проводят по всей поверхности заготовки, расположенной под инструментом. Участки заготовки, где не снимается металл, изолируют. Электрохимическую размерную обработку применяют при изготовлении деталей сложных форм (лопатки турбин и др.), для прошивки отверстий, оформления полостей штампов и т.п. (рис. 37.2, б).

При *электроабразивной и электроалмазной* обработке инструментами-электродами являются электропроводящие шлифовальные круги. Между заготовкой-анодом и инструментом-катодом за счет выступающих из связки зерен образуется межэлектродный зазор, куда подается электролит. Заготовка и шлифовальный круг совершают такие же движения, что и при механическом шлифовании. В итоге большая часть припуска удаляется в результате анодного растворения (до 90% при электроабразивной и 75% — при электроалмазной обработке), оставшаяся часть — за счет механического воздействия абразивных или алмазных зерен. Применяют эти разновидности электрохимической обработки для отделки труднообрабатываемых и нежестких деталей (рис. 37.2, в).

37.3. УЛЬТРАЗВУКОВОЙ И ЛУЧЕВОЙ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

При ультразвуковой обработке происходит направленное разрушение материала абразивными зёрнами под ударами инструмента (латунь, медь, чугун), который колеблется с ультразвуковой частотой. Под ударами зерен абразива скалываются мелкие частицы материала с поверхности заготовки. Точность обработки и шероховатость поверхности такие же, как и при шлифовании. Схема установки для ультразвуковой обработки аналогична показанной на рис. 31.2. Различие состоит в том, что при ультразвуковой обработке используют инструмент-пуансон, закрепленный на волноводе; обрабатываемую заготовку помещают в ванну с абразивной суспензией; магнитоstrictionный вибратор на станке устанавливают вертикально.

Абразивная суспензия содержит воду и абразивные зерна из карбида бора, карбида кремния или электрокорунда. Инструмент поджимается к заготовке с силой от 1 до 60 Н.

Ультразвуковую обработку применяют для прошивки отверстий различных сечений, узких пазов и изготовления деталей сложной конфигурации. Обработке подвергают заготовки из хрупких твердых материалов: керамики, стекла, кремния, кварца, ферритов, драгоценных минералов и др. Электронно-лучевой и лазерный методы — это разновидности лучевых методов формообразования поверхностей заготовок.

Необходимое для обработки перемещение электронного луча по поверхности заготовки осуществляется с помощью отклоняющей системы. Кроме того, в специальных электронно-лучевых установках предусмотрены продольные и поперечные перемещения.

Все перемещения, а также продолжительность импульсов и интервалы между ними задаются системой программного управления.

Электронно-лучевая обработка обладает преимуществом создания локальной концентрации высокой энергии, широким регулированием и управлением тепловыми процессами. Эта обработка весьма эффективна при получении отверстий малых диаметров (от 1 мм до 10 мкм), прорезании узких пазов, резке заготовок и т.п. Таким методом можно обрабатывать заготовки из различных труднообрабатываемых материалов: вольфрама, тантала, циркония, рутин, кварца, керамики и др.

Лазерную обработку применяют для обработки систем отверстий в электродах газоразрядных приборов, в деталях авиационной техники, для вырезки отверстий и щелей произвольной формы в керамических платах деталей микроэлектроники, обработки сложных профилей алмазных волок, профилирования многогранного инструмента из искусственных сверхтвердых материалов (эльбор, композиты).

Диаметр обрабатываемых отверстий — от 50 до 300 мкм, максимальная глубина отверстий — до 10 мм.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие материалы можно обрабатывать электрофизическими методами?
2. Какие существуют основные схемы электрофизической обработки?
3. Какой физико-химический принцип положен в основу электрохимической обработки?
4. Каковы возможности ультразвуковых и лучевых методов обработки?

Раздел XI

ОСНОВЫ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Глава 38

ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Нанонаука — исследование объектов и процессов с масштабами в несколько нанометров.

Нано — это одна миллиардная доля. Человеческий волос приблизительно толще одной молекулы в шестьдесят тысяч раз, и его толщина составляет примерно 50 000 нанометров. А размер объектов, который различает глаз человека, составляет 10 000 нанометров.

Физические исследования показывают, что частицы с таким размерным диапазоном в реакциях с их участием проявляют так называемые размерные эффекты. Они характеризуются квантово-размерными эффектами, то есть классические физические законы заменяются правилами квантовой механики. Удельная теплота, восприимчивость, проводимость и другие фундаментальные характеристики металла теряются, по крайней мере при низких температурах, когда частицы достигают размеров нанoshкалы. Кроме того, их специфика — немонотонная зависимость свойств, таких как температура плавления, давление, необходимое для перестройки кристаллической структуры, ионизационные потенциалы, энергии связи, отнесенные к одному атому металла, изменение межатомных расстояний, оптических и магнитных свойств, электронной проводимости, электрон-фононных взаимодействий и других от величины кластера — числа атомов M в нем.

Нанотехнологии — совокупность методов производства продуктов с заданной атомарной структурой путем манипулирования атомами и молекулами.

Наноматериаловедение отличается от традиционного не только созданием принципиально новых материалов, но и необходимостью конструирования приборного оснащения для работы с такими материалами. Сегодня благодаря нанотехнологии слово «нано» стало очень известным. Возможности исследования наномира, вплоть до манипуляции определенными атомами, появились после разра-

ботки специального исследовательского инструментария и прежде всего туннельного и атомного микроскопов.

Нанотехнология — это технология общего назначения, то есть она применима во всех сферах производства:

- материаловедении;
- авиации и космонавтике;
- электронике;
- медицине;
- вооружении;
- экологии.

38.1. ФУЛЛЕРЕНЫ

В молекуле C_{60} , которая является наиболее известным, а также наиболее симметричным представителем семейства фуллеренов, число шестиугольников равно 20. При этом каждый пятиугольник граничит только с шестиугольниками, а каждый шестиугольник имеет три общие стороны с шестиугольниками и три с пятиугольниками.

Структура молекулы фуллерена интересна тем, что внутри такого углеродного «мячика» образуется полость, в которую благодаря капиллярным свойствам можно ввести атомы и молекулы других веществ, что дает, например, возможность их безопасной транспортировки.

38.2. НАНОТРУБКИ

В 1991 г. японский профессор Сумио Иидзима обнаружил длинные углеродные цилиндры, получившие название нанотрубок.

Нанотрубка — молекула из более миллиона атомов углерода, представляющая собой трубку с диаметром около нанометра и длиной несколько десятков микрон. В стенках трубки атомы углерода расположены в вершинах правильных шестиугольников (рис. 38.1).

Эти изумительные нанотрубки в 100 тыс. раз тоньше человеческого волоса оказались на редкость прочным материалом! Нанотрубки в 50–100 раз прочнее стали и имеют в шесть раз меньшую плотность! *Модуль Юнга* — уровень сопротивления материала деформации — у нанотрубок вдвое выше, чем у обычных углеродных волокон (рис. 38.2). То есть трубки не только прочные, но и гибкие.

Правда, в настоящее время максимальная длина нанотрубок составляет десятки и сотни микрон — что, конечно, очень велико по атомным масштабам, но слишком мало для повседневного использования. Однако длина получаемых нанотрубок постепенно

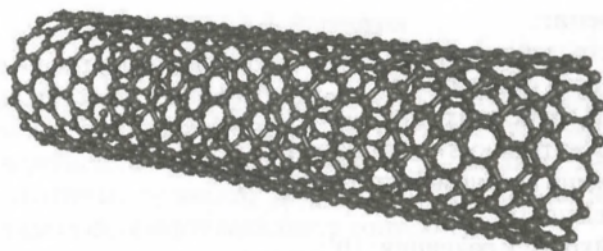


Рис. 38.1. Нанотрубка



Рис. 38.2. Диаграмма прочности нанотрубок по сравнению с высокопрочной сталью

увеличивается, сейчас ученые уже вплотную подошли к сантиметровому рубежу.

38.3. НАНОМАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ И КОНСТРУКЦИЙ АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Применение нанотехнологии в аэрокосмической технике способно обеспечить:

- снижение:
 - массы и объема: 10^3 ;
 - линейных размеров: 10^1 ;
 - энергопотребления: 10^4 ;
 - вибрации и шума: 10^2 ;

- повышение:
 - быстроедействие: 10^6 ;
 - емкости памяти: 10^6 ;
 - КПД солнечных батарей: 10^1 ;
 - чувствительности датчиков: 10^6 ;
 - времени автономной работы: 10^4 ;
 - надежности: 10^2 ;
 - стойкости к радиации: 10^1 ;
 - стойкости к перегрузкам: 10^2 .

38.4. ЭЛЕКТРОНИКА, МЕДИЦИНА, ЭКОЛОГИЯ

38.4.1. Электроника

В информационной сфере нанотехнология представлена следующими направлениями своего развития:

- 1) нанокomпьютеры;
- 2) квантовые компьютеры;
- 3) информационные сетевые устройства (оптическая связь — фотоника и новые типы волноводов, радиосвязь — электронные устройства со сверхширокой запрещенной зоной);
- 4) наноустройства хранения информации (квантовая память, одноквантовые запоминающие устройства, магнитные среды для сверхплотной записи, наносчитывающие головки, запись информации с использованием излучения ближнего поля, прецизионные приводы-позиционеры);
- 5) наносистемное моделирование (создание автоматизированных систем контроля за обработкой поверхностей наноразмерного уровня);
- 6) нейроэлектрические интерфейсы (построение наноустройств, которые позволяют соединять компьютеры с нервной системой);
- 7) искусственный интеллект и роботы.

38.4.2. Медицина

Нанотехнологии обеспечат ускорение разработки новых лекарств, создание нанопрепаратов и способов доставки лекарственных средств к очагу заболевания. Широкие перспективы открываются и в области медицинской техники (разработка средств диагностики, проведение безболезненных операций, создание искусственных органов). Со временем нанобиотехнологии будут предоставлять все больше возможностей для продления человеческой жизни и профилактики болезней.

38.4.3. Экология

Новые виды промышленности не будут производить отходов, отравляющих планету, а нанороботы смогут уничтожить последствия старых загрязнений — нанотехника восстановит озоновый слой, очистит от загрязнений почву, реки, атмосферу, океаны, демонтирует заводы, плотины, рудники, запечатает радиоактивные отходы в вечные самовосстанавливающиеся контейнеры.

Возможно использование фильтров и мембран на основе наноматериалов для очистки воды и воздуха, опреснения морской воды, а также биосенсоров для быстрого определения химических и биологических загрязнений, синтез новых экологически чистых материалов, новые методы утилизации и переработки отходов.

38.5. НАНОТЕХНОЛОГИ В СИСТЕМАХ ВООРУЖЕНИЯ

Основными направлениями в создании новых вооружений на базе нанотехнологии можно считать:

- 1) создание новых мощных миниатюрных взрывных устройств;
- 2) разрушение макроустройств с наноуровня;
- 3) шпионаж и подавление боли с использованием нейротехнологий;
- 4) биологическое оружие и наноустройства генетического навешивания;
- 5) наноснаряжение для солдат;
- 6) защита от химического и биологического оружия;
- 7) наноустройства в системах управления военной техникой;
- 8) нанопокрывтия для военной техники.

Глава 39

НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ И КОНСОЛИДИРОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

39.1. ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В данном учебнике не рассматриваются методы получения наноразмерных частиц, так как в машиностроении наиболее перспективно применение объемных нанокристаллических материалов.

Разработка методов получения объемных, консолидированных материалов с равномерной структурой по сечению заготовок, без пор, микротрещин и других дефектов структуры — актуальная задача, решение которой позволит расширить применение наноматериалов конструкционного назначения.

Основную часть конструкционных материалов составляют металлические, керамические, полимерные и композиционные. Выбор их для применения в конструкциях определяется соотношением между прочностью и пластичностью. Металлические материалы обладают наилучшим таким соотношением. Керамические и полимерные материалы менее пластичны, нежели металлические, а композиционные по указанным характеристикам занимают промежуточное положение между керамическими и металлическими материалами. Оптимальное соотношение между прочностью и пластичностью металлических материалов определило их преобладающую долю в общем объеме конструкционных материалов, которая превышает 90%.

Прирост прочностных свойств конструкционных материалов за последние десятилетия был обусловлен в основном разработкой сплавов с новым химическим и фазовым составом. В последние годы наметились новые пути улучшения свойств конструкционных материалов за счет целенаправленного формирования микро- и нанокристаллической структуры.

Формирование нанокристаллических структур позволяет получать конструкционные материалы с уникально высокими свойствами. Например, их микротвердость в 2–7 раз выше, чем твердость крупнозернистых аналогов, причем это не зависит от метода получения материала. Прочность нанокристаллических материалов при растяжении в 1,5–2 раза выше, чем у крупнозернистых аналогов.

Такие хрупкие материалы, как интерметаллиды, становятся пластичными при уменьшении размеров зерен ниже критических раз-

меров, что можно объяснить наличием специфических механизмов зарождения и распространения микротрещин. Для керамических нанокристаллических материалов обнаружена повышенная пластичность при низких температурах, ее можно использовать в промышленных процессах экструзии и прокатки.

39.2. КОНСОЛИДИРОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. КЛАССИФИКАЦИЯ

Имеются некоторые различия в классификации наноматериалов и в самом определении отдельных понятий. Один из вариантов классификации наноматериалов выглядит следующим образом:

- консолидированные материалы;
- нанопроводники;
- нанополимеры;
- фуллерен и нанотрубки;
- наночастицы и нанопорошки;
- нанопористые материалы;
- супромолекулярные структуры.

Консолидированные материалы — компакты, пленки и покрытия из металлов, сплавов и соединений, получаемых методом, например, интенсивной пластической деформации, контролируемой кристаллизации из аморфного состояния, порошковой металлургии, разнообразными приемами нанесения пленок и покрытий.

Нанополупроводники, нанополимеры и нанобиоматериалы могут быть как в изолированном состоянии, так и в консолидированном.

Фуллерены и нанотрубки стали изучать с момента открытия новой аллотропической формы углерода — кластеров C₆₀ и C₇₀, а затем — нанотрубок.

Наночастицы и наноструктура. Наночастицы носят изолированный характер, а нанопорошки — совокупный. Им может быть придан и консолидированный вид.

Супромолекулярная структура — структура, получаемая в результате возникновения слабых межатомных связей. Одной из наиболее распространенных классификаций для основных типов структур неполимерных наноматериалов является известная классификация Г. Глейтера. По химическому составу и распределению фаз выделяются четыре типа структуры (рис. 39.1): однофазные, многофазные с идентичными и неидентичными поверхностями раздела и матричные. Также можно выделить три типа структуры по форме: пластинчатую, столбчатую и содержащую равноосные включения. Учи-













Хим. состав Форма	Состав и распределение			
	Однофаз- ный	Многофазный		
		Статистическое		Матричное
		Идентичные границы	Неидентичные границы	
Пластиначатая				
Столбчатая				
Равноосная				

Рис. 39.1. Классификация консолидированных материалов

тываются также возможные сегрегации на межкристаллитных границах. Наиболее распространены одно- и многофазные объекты, столбчатые и многослойные структуры (чаще всего для пленок).

Нанокерамика — поликристаллические материалы, полученные спеканием неметаллических порошков с размером частиц менее 100 нм. Нанокерамику обычно делят на конструкционную (для создания механически прочных конструкций) и функциональную (со специфическими электрическими, магнитными, оптическими и термическими функциями).

Нанопористые материалы — с размером пор < 100 нм — представляют интерес как промежуточные структуры в технологическом процессе изготовления нанoeлектронных изделий, например как мультитокатализаторы, как источники энергии и сенсоры.

Сверхпроводники (имеются в виду высокотемпературные) представляют особый интерес, так как делают возможным создание дешевых электроприборов). С появлением методов формирования наноразмерных структур удастся создавать очень экономичные и быстродействующие элементы цифровой электроники, чувствительнейшие датчики магнитного поля и аналоговые элементы.

Нанoeлектромеханические системы — это совокупность электронных и механических элементов, выполненных в наноразмерном

исполнении на основе групповых методов. Далее рассматриваются методы получения наноконсолидированных материалов.

39.3. ИНТЕНСИВНАЯ ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ (ДИСПЕРГИРОВАНИЕ)

Весьма привлекательным способом получения консолидированных материалов является интенсивная пластическая деформация материалов с целью получения зерен менее 100 нм. Сущность этого метода заключается в многократной пластической деформации сдвига обрабатываемого материала при достижении высокой степени деформации. Использование этого метода позволяет наряду с уменьшением среднего размера зерна получать достаточно массивные образцы с практически беспористой структурой.

Использовались два метода — кручение под высоким давлением и равноканальное угловое прессование. Схематично оба способа приведены на рис. 39.2. Суть равноканального углового прессования заключается в продавливании заготовки через два пересекающихся под углами канала одинакового сечения. На плоскости пересечения каналов возникает однородная локализованная деформация сдвигом

$$\epsilon_{\text{сд}} = 2N \text{ctg } \varphi,$$

где N — число циклов продавливания; φ — угол пересечения каналов. Почти однородная по сечению деформация достигается за 8–10 проходов.

Ультразвуковое диспергирование обусловлено действием звуковых колебаний средней и высокой интенсивности на вещество. УЗ-облучение в дисперсионной среде приводит к разрывам сплош-

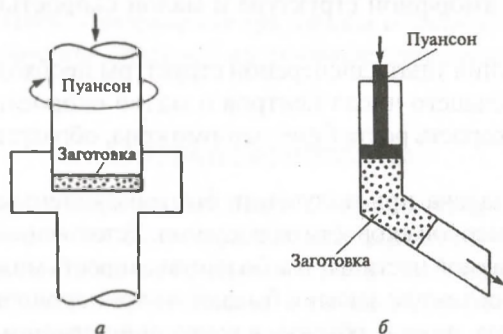


Рис. 39.2. Схемы интенсивной пластической деформации:

а — кручение под высоким давлением; *б* — равноканальное угловое прессование

ности вследствие локального понижения давления P ниже критического $P_{кр}$ — акустическая кавитация.

39.4. ОСНОВЫ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ КОМПАКТИРОВАНИЕМ И СПЕКАНИЕМ ПОРОШКОВ

Эта технология отличается универсальностью: с ее помощью можно получать изделия различного состава, формы. Однако сразу следует отметить и недостатки порошковой технологии. Основные из них:

- ограниченность размеров порошковых изделий;
- сложность сохранения наноструктуры при спекании;
- низкая текучесть и прессуемость;
- остаточная пористость.

Компактирование нанопорошков можно проводить холодным статическим прессованием с односторонним или двухсторонним приложением давления; горячим аксиальным прессованием; холодным или горячим изостатическим прессованием в гидро- или газостатах; формованием литьем из коллоидных гелей с последующим спеканием; магнитно-импульсным, ударным и взрывным прессованием; ультразвуковым прессованием.

39.5. НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ АМОРФНЫХ И БЫСТРОЗАКАЛЕННЫХ СПЛАВОВ

Формирование нанокристаллической и дисперсной микрокристаллической структуры — типичная особенность кристаллизации аморфных сплавов, обусловленная наличием готовых центров кристаллизации в аморфной структуре и малой скоростью роста кристаллов.

Для получения ультрадисперсной структуры необходимо наличие как можно большего числа центров и малой скорости кристаллизации. Если скорость роста будет заторможена, образуется аморфная структура.

Основная задача при получении быстрозакаленных сплавов — обеспечение высокой скорости охлаждения. Естественно, чем меньше размер охлаждаемой частицы, тем большую скорость можно получить. Потому часто объектом закалки бывают микропорошки, тончайшие фольги, волокна, реже — объекты в консолидированном состоянии.

К технологическим методам помимо быстрозакаленных сплавов относятся газовое распыление, центробежное, сверхбыстрого затвердевания, спиннингование.

Все рассмотренные методы направлены на получение материала для последующего формирования их в консолидированном виде. Однако есть методы получения быстрозакаленных ультрадисперсных металлов сразу в консолидированном виде. К ним относятся методы высокоскоростного затвердевания тонкой пленки на теплопроводящей поверхности.

39.6. ФОРМИРОВАНИЕ НАНОСТРУКТУРЫ ДИСПЕРСНЫМИ ВЫДЕЛЕНИЯМИ

Дисперсионное упрочнение происходит при старении многих сплавов, предварительно прошедших закалку на твердый раствор. Этому виду упрочнения подвергаются сплавы на основе алюминия, меди, никеля, кобальта, мартенситностареющие стали, микролегированные конструкционные стали и др. Прочность повышается вследствие распада пересыщенного твердого раствора с образованием дисперсных упрочняющих фаз.

Достоинством дисперсионно-твердеющих сплавов является то, что они могут подвергаться формоизменению с целью изготовления деталей, пока легирующие элементы находятся в растворе, после чего их можно упрочнять за счет старения.

Максимальная величина предела текучести дисперсионно-упрочненных алюминиевых сплавов, содержащих Cu, Mg, Zn, без применения холодной обработки давлением может составлять при комнатной температуре около 700 МПа; для медных сплавов, легированных бериллием, — 1000—1100 МПа; для никелевых сплавов типа нимоник — 1400 МПа.

Упрочняющими фазами в сталях могут быть карбиды, нитриды и интерметаллиды. Превращения при закалке и старении в титановых сплавах, в принципе, похожи на соответствующие превращения в стали.

39.7. НАНОКОМПОЗИТЫ

Среди консолидированных наноматериалов видное место занимают наноккомпозиты, структуры которых характеризуются включением вторичной фазы с размерами в несколько нанометров (10—100 нм). Содержание ее не велико — от долей до нескольких процентов. Вместе с тем введение таких количеств металлов оказывается достаточным, чтобы существенно изменить важные физические свойства, например такие как прочность, каталитическая активность в химических реакциях, магнитные и электромагнитные свойства.

За счет использования наноразмерных наполнителей можно увеличить прочность композитов в 2–2,5 раза. В перспективе наполнитель из специально ориентированных углеродных нанотрубок способен в 5–10 раз повысить удельную прочность.

Процессы, в результате которых можно получить нанопорошки или ультрадисперсные порошки — кристаллизация, рекристаллизация, фазовые превращения, высокие механические нагрузки, интенсивная пластическая деформация, полная или частичная кристаллизация аморфных структур.

По структуре различают нанокомпозиты с волокнистым наполнителем, дисперсно-упрочненные, на полимерной основе, нанокомпозиты с керамическим наполнителем.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Арзамасов Б.Н., Макарова В.Н., Мухин Г.Г. и др.* Материаловедение. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001.
2. *Волков Г.М., Зуев В.М.* Материаловедение. М.: Академия, 2008.
3. *Гладштейн В.И.* Физика прочности и механические свойства материалов. М.: МГВМИ, 2005.
4. *Захаров С.К., Зайцев О.И., Иванов А.В. и др.* Технология конструкционных материалов. В 4 т. Тула: ТулГУ, 2007.
5. *Кушнер В.С., Верещака А.С., Схирладзе А.Г. и др.* Технологические процессы в машиностроении. Омск: ОМГТУ, 2005.
6. *Новиков И.И.* Металловедение. В 2 т. М.: МИСиС, 2009.
7. *Перинский В.В., Лясников В.Н., Фетисов Г.П.* Материаловедение специальных материалов машиностроения. Саратов: СГТУ, 2011.
8. *Сироткин О.С.* Основы инновационного материаловедения. М.: ИНФРА-М, 2011.
9. *Тарасенко Л.В., Пахомова С.А., Унчикова М.В., Герасимов С.А.* М.: ИНФРА-М, 2012.
10. *Фетисов Г.П., Матюнин В.М., Соколов В.С. и др.* Материаловедение и технология материалов. М.: Юрайт, 2014.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
-------------------	---

Часть 1 МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
----------------	---

Раздел I СТРУКТУРА МАТЕРИАЛОВ

Глава 1

КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ	6
1.1. Кристаллы	6
1.2. Типы связей	7
1.3. Виды кристаллов	9
1.4. Анизотропия кристаллов	10
1.5. Полиморфизм (аллотропия)	11
1.6. Аморфные структуры	11
1.7. Структура неметаллических твердых тел	13
1.8. Дефекты кристаллической решетки	14
1.9. Точечные дефекты	15
1.10. Линейные дефекты	15
1.11. Поверхностные, или плоские, дефекты	18
1.12. Объемные дефекты	20
1.13. Влияние облучения на свойства металлов	20
Контрольные вопросы	21

Глава 2

КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ	22
2.1. Энергетические условия процесса кристаллизации	22
2.2. Механизм процесса кристаллизации	24
2.3. Форма кристаллических образований	26
2.4. Вторичная кристаллизация	28
Контрольные вопросы	30

Глава 3

СТРОЕНИЕ СПЛАВОВ	31
3.1. Определение сплава	31
3.2. Механическая смесь	32
3.3. Твердые растворы	32
3.4. Химические соединения	33
3.5. Промежуточные фазы	34
Контрольные вопросы	36

Глава 4

ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ	37
4.1. Определение диаграммы состояния	37
4.2. Правило фаз	37

4.3.	Диаграмма состояния сплавов, образующих неограниченные твердые растворы.....	39
4.4.	Диаграмма состояния сплавов, образующих механические смеси чистых компонентов	42
4.5.	Диаграмма состояния сплавов для случая ограниченной растворимости компонентов в твердом состоянии	44
4.6.	Диаграмма состояния сплавов для случая перитектического превращения.....	45
4.7.	Диаграмма состояния сплавов для случая образования химического соединения.....	45
	<i>Контрольные вопросы</i>	46

Раздел II ПЛАСТИЧНОСТЬ И ПРОЧНОСТЬ МЕТАЛЛОВ

Глава 5

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЛАСТИЧНОСТИ И ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛОВ.....		47
5.1.	Общая характеристика механических свойств.....	47
5.2.	Характеристики прочности и пластичности	51
5.3.	Твердость.....	55
5.4.	Разрушение металлов.....	57
5.5.	Факторы, влияющие на пластичное и хрупкое состояние	58
5.6.	Ударная вязкость	60
5.7.	Усталость металлов.....	61
5.8.	Влияние нагрева на структуру и свойства холоднодеформированных металлов	62
	<i>Контрольные вопросы</i>	67

Раздел III ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СПЛАВОВ

Глава 6

ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫЕ СПЛАВЫ.....		68
6.1.	Компоненты и фазы в сплавах железа с углеродом.....	68
6.2.	Диаграмма состояния «железо — цементит»	70
6.3.	Влияние легирующих элементов на равновесную структуру сталей	73
	<i>Контрольные вопросы</i>	75

Глава 7

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА		76
7.1.	Определение, назначение видов термообработки	76
7.2.	Основные виды термообработки стали	76
7.3.	Отжиг и нормализация	78
7.4.	Закалка.....	81
7.5.	Внутренние напряжения в закаленной стали	82
7.6.	Способы закалки.....	83
7.7.	Отпуск.....	85
7.8.	Старение	86
7.9.	Обработка холодом	88
7.10.	Термомеханическая обработка (ТМО) стали.....	89
	<i>Контрольные вопросы</i>	90

Глава 8

ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ	91
8.1. Определение химико-термической обработки	91
8.2. Цементация	93
8.3. Азотирование	96
8.4. Нитроцементация (цианирование)	97
8.5. Борирование	99
8.6. Диффузионная металлизация (насыщение металлами)	99
Контрольные вопросы	102

Раздел IV

СТАЛИ И ЧУГУНЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Глава 9

КОНСТРУКЦИОННЫЕ СТАЛИ	103
9.1. Классификация сталей	103
9.2. Влияние углерода и постоянных примесей на свойства сталей	105
9.3. Маркировка сталей	108
9.4. Углеродистые конструкционные стали	109
9.5. Углеродистые стали для фасонного литья	112
Контрольные вопросы	112

Глава 10

ЛЕГИРОВАННЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ СТАЛИ	113
10.1. Влияние легирующих элементов на свойства конструкционных сталей	113
10.2. Улучшаемые и высокопрочные легированные стали	115
10.3. Рессорно-пружинные легированные стали	117
10.4. Конструкционные (строительные) низколегированные стали	118
10.5. Шарикоподшипниковые стали	119
10.6. Износостойкие стали	120
Контрольные вопросы	120

Глава 11

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СТАЛИ И СПЛАВЫ	121
11.1. Углеродистые и легированные инструментальные стали	121
11.2. Быстрорежущие стали	123
11.3. Штамповые стали	125
Контрольные вопросы	129

Глава 12

КОНСТРУКЦИОННЫЕ ЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ И СПЛАВЫ С ОСОБЫМИ СВОЙСТВАМИ	130
12.1. Коррозионностойкие стали	130
12.2. Кислотостойкие стали и сплавы	132
12.3. Коррозионностойкие чугуны	133
12.4. Жаропрочные стали	134
12.5. Жаростойкие стали	137
Контрольные вопросы	138

Глава 13

СТАЛИ И СПЛАВЫ С ОСОБЫМИ ФИЗИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ 139

13.1. Магнитные стали и сплавы	139
13.2. Стали и сплавы с высоким электрическим сопротивлением.....	145
13.3. Сплавы с заданным значением коэффициента теплового расширения.....	146
13.4. Сплавы с эффектом памяти формы	148
<i>Контрольные вопросы</i>	150

Глава 14

ЧУГУНЫ 151

14.1. Структура и свойства чугунов.....	151
14.2. Серые чугуны.....	152
14.3. Антифрикционные и белые чугуны	155
14.4. Высокопрочные чугуны.....	156
14.5. Ковкие чугуны	157
14.6. Легированные чугуны	157
14.7. Термообработка чугунов	159
<i>Контрольные вопросы</i>	162

Раздел V ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ

Глава 15

АЛЮМИНИЙ И ЕГО СПЛАВЫ 163

15.1. Характеристика алюминия	163
15.2. Классификация сплавов алюминия	164
15.3. Термообработка алюминиевых сплавов	165
15.4. Деформируемые алюминиевые сплавы, упрочняемые термообработкой.....	167
15.5. Деформируемые алюминиевые сплавы, не упрочняемые термообработкой	170
15.6. Литейные алюминиевые сплавы.....	170
15.7. Спеченные алюминиевые сплавы	173
15.8. Алюминиевые подшипниковые сплавы.....	174
<i>Контрольные вопросы</i>	174

Глава 16

СПЛАВЫ НА ОСНОВЕ МЕДИ 175

16.1. Свойства меди.....	175
16.2. Латунь	177
16.3. Бронзы	178
16.4. Медно-никелевые сплавы	181
<i>Контрольные вопросы</i>	182

Глава 17

СПЛАВЫ НА ОСНОВЕ ТИТАНА 183

17.1. Свойства титана.....	183
17.2. Промышленные титановые сплавы	185
17.3. Термическая обработка титановых сплавов	187
<i>Контрольные вопросы</i>	188

Глава 18

СПЛАВЫ НА ОСНОВЕ МАГНИЯ..... 189

- 18.1. Свойства магния 189
- 18.2. Промышленные магниевые сплавы 190
- Контрольные вопросы* 193

Глава 19

СПЛАВЫ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ, БЕРИЛЛИЯ И СВИНЦА 194

- 19.1. Никель и его сплавы 194
- 19.2. Бериллий и его сплавы 198
- 19.3. Антифрикционные сплавы на свинцовой основе 201
- Контрольные вопросы* 203

Раздел VI

НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Глава 20

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ 204

- 20.1. Определение композиционных материалов 204
- 20.2. Структура и свойства композиционных материалов 204
- 20.3. Дисперсно-упрочненные композиционные материалы 206
- 20.4. Композиты, армированные волокнами 207
- 20.5. Наноккомпозиты 209
- Контрольные вопросы* 210

Глава 21

ПЛАСТИЧЕСКИЕ МАССЫ 211

- 21.1. Пластмассы 211
- 21.2. Классификация пластмасс 213
- 21.3. Резины 214
- 21.4. Приготовление резиновых смесей 217
- Контрольные вопросы* 218

Часть 2

ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ

Раздел VII

ОСНОВЫ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Глава 22

ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА И УСЛОВИЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ..... 219

- 22.1. Физическая природа кристаллизации металлов 219
- 22.2. Литейные свойства 223
- Контрольные вопросы* 226

Глава 23

ЛИТЬЕ В ПЕСЧАНЫЕ ФОРМЫ 227

- 23.1. Литейная технологическая оснастка 227

23.2.	Формовочные смеси	231
23.3.	Стержневые смеси	234
23.4.	Специальные формовочные смеси.....	234
	<i>Контрольные вопросы</i>	236

Глава 24

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВИДЫ ЛИТЬЯ.....	237
24.1. Литье по выплавляемым моделям.....	237
24.2. Литье в оболочковые формы.....	240
24.3. Литье в металлические формы (кокили)	242
24.4. Литье под давлением.....	245
24.5. Центробежное литье.....	247
24.6. Специальные способы литья.....	248
Контрольные вопросы	251

Раздел VIII ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Глава 25

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ		252
25.1.	Сущность обработки металлов давлением.....	252
25.2.	Прокатное производство.....	258
25.3.	Волочение	262
25.4.	Прессование	263
	<i>Контрольные вопросы</i>	265

Глава 26

ОБЪЕМНАЯ ШТАМПОВКА	266
<i>Контрольные вопросы</i>	267

Глава 27

ЛИСТОВАЯ ШТАМПОВКА.....		268
27.1.	Листовая штамповка — определение.....	268
27.2.	Разновидности листовой штамповки.....	268
<i>Контрольные вопросы</i>		273

Раздел IX СВАРОЧНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Глава 28

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА.....		274
28.1.	Физические основы получения сварного соединения.....	275
28.2.	Свариваемость.....	278
	<i>Контрольные вопросы</i>	279

Глава 29

ТЕРМИЧЕСКИЕ ВИДЫ СВАРКИ	280
29.1. Ручная дуговая сварка	280

29.2.	Понятие об электрической дуге и ее свойствах.....	281
29.3.	Электроды для ручной сварки.....	284
29.4.	Основные виды сварных соединений и металлургические процессы при сварке.....	285
29.5.	Автоматическая сварка под флюсом	288
29.6.	Электрошлаковая сварка.....	291
29.7.	Электродуговая сварка в среде защитных газов	293
29.8.	Электронно-лучевая сварка.....	295
29.9.	Лазерная сварка.....	297
29.10.	Газовая сварка металлов.....	298
29.11.	Специальные термические процессы в сварочном производстве.....	299
	<i>Контрольные вопросы</i>	302

Глава 30

СВАРКА ДАВЛЕНИЕМ С НАГРЕВОМ (ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЙ КЛАСС)..... 304

30.1.	Электрическая контактная сварка. Сущность процесса.....	304
30.2.	Стыковая сварка.....	305
30.3.	Точечная сварка	307
30.4.	Шовная, или роликовая, сварка	310
30.5.	Сварка трением	310
30.6.	Диффузионная сварка в вакууме.....	311
	<i>Контрольные вопросы</i>	313

Глава 31

СВАРКА ДАВЛЕНИЕМ БЕЗ НАГРЕВА..... 314

31.1.	Холодная сварка	314
31.2.	Ультразвуковая сварка.....	315
31.3.	Сварка взрывом	317
	<i>Контрольные вопросы</i>	318

Глава 32

ПАЙКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ..... 319

32.1.	Физическая сущность процесса пайки	319
32.2.	Материалы для пайки.....	321
32.3.	Способы пайки.....	322
32.4.	Типы паяных соединений	324
32.5.	Контроль качества сварных и паяных соединений.....	325
	<i>Контрольные вопросы</i>	329

Раздел X

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Глава 33

КЛАССИФИКАЦИЯ, ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ..... 330

33.1.	Сущность процесса.....	330
33.2.	Инструментальные материалы	340
	<i>Контрольные вопросы</i>	342

Глава 34

ОБРАБОТКА ЗАГОТОВОК НА ТОКАРНЫХ СТАНКАХ.

ТИПЫ СТАНКОВ ТОКАРНОЙ ГРУППЫ 343

34.1. Общие сведения о токарных станках	343
34.2. Виды токарных резцов.....	348
<i>Контрольные вопросы</i>	350

Глава 35

ОБРАБОТКА ЗАГОТОВОК НА СВЕРЛИЛЬНЫХ, РАСТОЧНЫХ, СТРОГАЛЬНЫХ, ДОЛБЕЖНЫХ И ПРОТЯЖНЫХ СТАНКАХ

351

35.1. Характеристика метода обработки сверлением и растачиванием.....	351
35.2. Виды режущего инструмента. Элементы и геометрия спирального сверла	351
35.3. Методы обработки строганием	355
35.4. Обработка на протяжных станках	358
<i>Контрольные вопросы</i>	358

Глава 36

ОБРАБОТКА ЗАГОТОВОК НА ФРЕЗЕРНЫХ, ШЛИФОВАЛЬНЫХ И ОТДЕЛОЧНЫХ СТАНКАХ

360

36.1. Обработка заготовок на фрезерных станках	360
36.2. Обработка заготовок на шлифовальных и отделочных станках	361
36.3. Типы шлифовальных станков	363
36.4. Специальные методы отделки поверхностей.....	364
<i>Контрольные вопросы</i>	368

Глава 37

ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ.....

369

37.1. Электрофизические методы обработки	369
37.2. Электрохимические методы обработки	372
37.3. Ультразвуковой и лучевой методы обработки.....	373
<i>Контрольные вопросы</i>	374

Раздел XI

ОСНОВЫ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Глава 38

ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

375

38.1. Фуллерены	376
38.2. Нанотрубки.....	376
38.3. Наноматериалы для деталей и конструкций авиационно-космической техники	377
38.4. Электроника, медицина, экология	378
38.4.1. <i>Электроника</i>	378
38.4.2. <i>Медицина</i>	378
38.4.3. <i>Экология</i>	379
38.5. Нанотехнологии в системах вооружения.....	379

Глава 39

НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ И КОНСОЛИДИРОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

380

39.1. Определения	380
-------------------------	-----

39.2.	Консолидированные материалы. Классификация.....	381
39.3.	Интенсивная пластическая деформация (диспергирование).....	383
39.4.	Основы получения наноматериалов компактированием и спеканием порошков.....	384
39.5.	Нанокристаллические структуры на основе аморфных и быстрозакаленных сплавов.....	384
39.6.	Формирование наноструктуры дисперсными выделениями.....	385
39.7.	Наноккомпозиты	385

ЛИТЕРАТУРА.....	387
------------------------	------------

По вопросам приобретения книг обращайтесь:
Отдел продаж «ИНФРА-М» (оптовая продажа):

127282, Москва, ул. Полярная, д. 31в, стр. 1

Тел. (495) 380-4260; факс (495) 363-9212

E-mail: books@infra-m.ru

Отдел «Книга—почтой»:

тел. (495) 363-4260 (доб. 232, 246)

Учебное издание

Геннадий Павлович Фетисов
Фаат Асадуллович Гарифуллин

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ

Учебник

Оригинал-макет подготовлен в НИЦ ИНФРА-М

Подписано в печать 25.03.2014.

Формат 60×90/16. Бумага офсетная. Гарнитура Newton.

Усл. печ. л. 25,0. Уч.-изд. л. 26,8.

Тираж 500 экз. (1—200). Заказ № 2908.

ТК 215100-12378-250314

ООО «Научно-издательский центр ИНФРА-М»

127282, Москва, ул. Полярная, д. 31В, стр. 1

Тел.: (495) 380-05-40, 380-05-43. Факс: (495) 363-92-12.

E-mail: books@infra-m.ru <http://www.infra-m.ru>

Отпечатано с готовых файлов заказчика
в ОАО «Первая Образцовая типография»,
филиал «УЛЬЯНОВСКИЙ ДОМ ПЕЧАТИ»
432980, г. Ульяновск, ул. Гончарова, 14